



**Sofia Margarida
Figueiredo Marques**

**Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios
Antigos**



**Sofia Margarida
Figueiredo Marques**

**Estudo de Argamassas de Reabilitação de Edifícios
Antigos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira, Professor Auxiliar da Secção Autónoma de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e do Professor Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Doutor Rui Ramos Ferreira e Silva
Professor Associado, Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Jorge de Novais Telles de Faria Correia Bastos
Professor Catedrático, Universidade Técnica de Lisboa

Prof. Doutor João Paulo Pereira de Freitas Coroado
Professor Coordenador, Instituto Politécnico de Tomar

Prof. Doutor Victor Miguel Carneiro de Sousa Ferreira (Orientador da dissertação)
Professor Auxiliar, Universidade de Aveiro

agradecimentos

Ao Doutor Victor Ferreira e ao Doutor João Labrincha, por toda a ajuda e orientação que me disponibilizaram durante o decorrer deste trabalho, ao Luís Silva, Rui Ribeiro e todo o pessoal da Weber Cimenfix pela simpatia com que me acolheram e pela ajuda e atenção que me disponibilizaram durante a realização da parte experimental, ao João Camarinha da Weber Cimenfix pela preciosa colaboração com a programação informática e a toda a minha família, namorado e amigos pela dedicação e apoio.

A todos muito obrigado.

Este trabalho teve o apoio financeiro do Projecto Europeu INTERREG III B – *Materials Network for the Atlantic Area*.

palavras-chave

Argamassas; reabilitação; edifícios; materiais de construção.

resumo

Hoje em dia um dos principais problemas da reabilitação de edifícios antigos está relacionado com as argamassas. Estas podem ser constituídas por variadíssimos materiais, que não são facilmente reconhecíveis por terem, ao longo do tempo, passado por várias reacções e processos de degradação. A reabilitação de edifícios deve garantir, em primeiro lugar, uma compatibilidade físico-química e mecânica entre as argamassas de restauro e as antigas, sem descurar a estética, o que normalmente só é conseguido utilizando o mesmo tipo de materiais, e mesmo assim a compatibilidade não é assegurada.

Os objectivos da reabilitação em edifícios antigos são a limpeza generalizada da sujidade existente, a reposição das condições de estabilidade e, se possível, a obtenção de melhores condições de resistência à acção de agentes degradativos. Atingir todos estes propósitos torna-se um trabalho difícil e moroso, e existe um grande interesse em sistematizar todo este processo, tornando-o mais rápido e eficiente. Com o presente trabalho pretende-se criar uma matriz que permita relacionar, de forma mais ou menos imediata, e partindo de algumas propriedades físico-químicas e mecânicas, argamassas originais e de restauro. Desta forma é possível acelerar todo o processo de restauro e diminuir custos de operação, possibilitando intervenções mais frequentes que evitem uma degradação acelerada da estrutura.

Para criar a matriz começou-se por estudar os materiais mais utilizados em argamassas antigas e o tipo de reacções as que estes estão sujeitos, quer durante a presa, quer devido a mecanismos de degradação. Com estes conhecimentos foi criada uma base de dados com um número limitado de amostras preparadas em laboratório, que servirão de base para a comparação da matriz. Foram também seleccionadas algumas técnicas de caracterização que permitem obter informação relevante sobre uma argamassa, e definiu-se um procedimento para o relacionamento das argamassas antigas e de restauro. Por fim foi criada a matriz em formato informático, e foram testadas algumas argamassas antigas. Foram também analisadas duas argamassas preparadas em laboratório com o objectivo de servirem propósitos de restauro, com constituição química bem definida, sendo assim possível testar o grau de fiabilidade de matriz criada. Embora a fiabilidade da matriz tenha sido comprovada continuam, no entanto, ainda a existir algumas lacunas, que podem ser contornadas pelo contínuo desenvolvimento da base de dados através da inserção de novas amostras.

keywords

Mortars; rehabilitation; buildings; construction materials.

abstract

Nowadays, one of the main problems associated with old building rehabilitation is related with mortars. These can be constituted by a large amount of different materials, which are not easy recognizable because of all the reactions and degradation processes they had been through. Building rehabilitation must guarantee, in first hand, physical-chemical and mechanical compatibility between restoration mortars and the old ones, without taking out the aesthetic importance. In most cases, this is only achievable using the same type of materials, and even in this way the compatibility is not assured.

The objectives of the restoration in old buildings are the generalized cleanness of the dirtiness existing, the replacement of the conditions of stability and, if possible, the attainment of better conditions of resistance to the action of degradation agents. To reach all these intentions become a difficult and slow work, and exists a great interest in systemize all this process, making it faster e more efficient. With the present work it is intended to create a matrix that allows relating, in a more or less immediate form, and knowing some physical-chemical and mechanical properties, original and restoration mortars. In this form it is possible to speed up all the process of restoration and to diminish operation costs, making possible more frequent interventions that prevent a sped up degradation of the structure.

To create the matrix it was started the studying of the most used materials in old mortars and the type of reactions that these ones were subjected, during setting and due to degradation mechanisms. With these knowledge a database with a limited number of samples prepared in laboratory was created, that will serve of support for the comparison of the matrix. Also some characterization techniques had been selected that allow getting important information on a mortar, and it was defined a procedure for the relationship of old and restoration mortars. Finally the matrix in informatics format was created, and some old mortars were tested. Also had been analysed two mortars laboratory prepared with the intention to serve restoration purposes, with well defined chemical constitution, and therefore it was possible to test the degree of reliability of the created matrix. The reliability of the matrix was proven, however it still continues to exist some gaps, which can be contoured with the continuous development of the database through the insertion of new samples.

Índice

1	Introdução	6
2	As Argamassas	9
2.1	Argamassas de alvenaria.....	11
2.2	Argamassas para estuque e reboco	12
2.3	Argamassas de suporte para pavimentos	13
2.4	Evolução das argamassas.....	14
3	Propriedades e constituintes das argamassas.....	17
3.1	Agregados	20
3.2	Ligantes.....	25
3.2.1	Ligantes de gesso	26
3.2.2	Ligantes de cal	27
3.2.3	Ligantes de cimento	33
3.3	Adjuvantes	39
4	A deterioração das argamassas	45
4.1	Dissolução de componentes das argamassas	46
4.2	Acção dos poluentes atmosféricos	47
4.3	Cristalização de sais solúveis.....	48
4.4	Efeito dos ciclos gelo - degelo	49
4.5	Reacções de expansão.....	50
4.6	Variações térmicas e higrométricas	51
4.7	Deterioração devida a causas biológicas.....	51
5	Argamassas para Restauro.....	53
5.1	Caracterização de Argamassas.....	56
5.1.1	Técnicas de caracterização discriminatórias	57
5.1.2	Técnicas de caracterização comparativas.....	63
6	Criação da matriz.....	69
6.1	Identificação dos agregados	70

6.2	Identificação do ligante.....	72
6.2.1	Ligantes de gesso	73
6.2.2	Ligantes de cal aérea	73
6.2.3	Ligantes de cal hidráulica derivada da calcinação de calcário e argila	75
6.2.4	Ligantes de cal e pozolanas naturais	76
6.2.5	Ligantes de cal e pozolanas artificiais	76
6.2.6	Ligantes de cimento	77
6.3	Planeamento da argamassa de restauro.....	79
7	Parte Experimental	83
7.1	Descrição dos ensaios	87
7.2	Caracterização das amostras	93
7.2.1	Amostras preparadas em laboratório.....	93
7.2.2	Argamassas antigas e de reabilitação	112
7.3	Processos de decisão para a criação da matriz informatizada.....	125
7.4	Teste à fiabilidade da matriz	129
8	Conclusões	135
9	Referências Bibliográficas	140
	Anexo – Informatização da matriz <i>The Wall</i>	145

Índice de Figuras

Fig. 1 – Constituintes comuns de uma argamassa: agregados, ligantes de gesso, cal ou cimento e água.	10
Fig. 2 - Argamassa de alvenaria (união de estruturas)	11
Fig. 3 – Argamassa de reboco.....	12
Fig. 4 – Fissuração de uma argamassa devido à contracção do ligante durante a secagem	19
Fig. 5 - Ilustração que demonstra o efeito do uso de agregados com uma distribuição de tamanhos alargada.	20
Fig. 6 - Tipos de ligantes de argamassas	25
Fig. 7 – Esquema da acção dispersiva dos plastificantes: (a) partículas floculadas; (b) partículas dispersadas por efeito do plastificante, facilitando a hidratação.	40
Fig. 8 – Acção dos agentes introdutores de ar.....	43
Fig. 9 – Cristalização de sais à superfície – eflorescências.....	48
Fig. 10 – A cristalização de sais logo abaixo da superfície pode levar à esfoliação das camadas mais superficiais de uma argamassa, bastante mais agressiva que cristalização de sais à superfície, ou eflorescências.	49
Fig. 11 - Relação típica entre a percentagem de massa perdida pela libertação de CO ₂ e o rácio CO ₂ /H ₂ O _{est} para ligantes de cal típica e para ligantes de variável carácter hidráulico.	62
Fig. 12 - Relação típica entre a água fisicamente adsorvida (perda de massa a T<120 °C) e a água ligada a componentes hidráulicos (perda de massa em 200-600 °C).....	62
Fig. 13 – Procedimento inicial para identificação dos agregados de uma argamassa	71
Fig. 14 – Metodologia proposta para a identificação do ligante	79
Fig. 15 – Amostras de argamassas antigas: Avanca 2 (a), Avanca acabamento (b), Azurva 2 (c), Olhão (d), Elvas 1 (e) e Elvas 2 (f).....	84
Fig. 16 – Máquina universal de ensaios de flexão e compressão utilizada	88
Fig. 17 - Provetes normalizados com dimensões 25x25x285 mm ³ e 4x4x16 cm ³	89
Fig. 18 – Equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade	90
Fig. 19 – Formação de precipitados que indicam a presença de cloretos na amostra Azurva 2.....	91
Fig. 20 – Variação da porosidade das argamassas com a percentagem de agregados e tipo de ligante. As amostras de cal com pozolanas estão incluídas nas de ligante de cal.	96
Fig. 21 – Proporcionalidade entre as resistências à compressão e à flexão.	98
Fig. 22 – Difractogramas das amostras Gesso1 (a), Cal 1 (b) e Micro Cal (c)..	100

Fig. 23 – Difractogramas das argamassas de Cal pura (a), CH pura (b) e Cim puro (c).....	101
Fig. 24 – Difractogramas das amostras B Cal 3 (a), B Cal 4 (b) e POZ 3 (c).	102
Fig. 25 – Análise ATD/TG das amostras Gesso 4 (a) e Gesso CH (b).	104
Fig. 26 – Análise ATD/TG das amostras Cal 1 (a) e Micro Cal (b).....	106
Fig. 27 - Relação entre a percentagem de massa perdida pela libertação de CO ₂ e o índice de hidraulicidade para as argamassas desenvolvidas em laboratório.	108
Fig. 28 – Análise ATD/TG das amostras Cim (a), CH 1 (b), B Cal 4 (c), B Cal 3 (d) e Micro Cim (e).....	109
Fig. 29 – Ampliação da análise ATD/TG para a amostra Cim.....	110
Fig. 30 – Difractogramas das amostras Avanca 2 (a), Avanca acabamento (b), R 1 (c) e R 2 (d).	117
Fig. 31 – Análises ATD/TG das amostras Avanca 1 (a), Avanca 2 (b), Avanca acabamento (c), Azenha (d), R 1 (e) e R 2 (f).....	121
Fig. 32 – Perspectiva da página inicial do programa <i>The Wall</i>	128
Fig. 33 – Perspectiva do programa <i>The Wall</i> com os resultados obtidos para a amostra Azenha..	129
Fig. 34 – Organograma representativo das associações entre os vários parâmetros de decisão inicial, efectuadas em base de dados Access.....	147

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Algumas propriedades dos componentes principais do cimento Portland	34
Tabela 2 – Métodos de caracterização em argamassas.....	67
Tabela 3 – Resultados de termogravimetria e rácios CO ₂ /H ₂ O _{est} típicos para ligantes à base de cal77	
Tabela 4 – Propriedades estudadas para as argamassas desenvolvidas em laboratório, que serão introduzidas como base de dados na matriz.....	93
Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos às amostras desenvolvidas em laboratório.	97
Tabela 6 – Análise mineralógica obtida por DRX das amostras desenvolvidas em laboratório.....	99
Tabela 7 - Resultados de termogravimetria para as amostras desenvolvidas laboratorialmente.....	107
Tabela 8 – Descrição visual e distribuição granulométrica de argamassas antigas, R 1 e R 2.....	112
Tabela 9 - Resultados da caracterização das amostras de argamassas antigas, R 1 e R 2.....	114
Tabela 10 – Análise mineralógica por DRX das argamassas antigas, R 1 e R 2.....	116
Tabela 11 - Resultados de ATD/TG para as argamassas antigas, R 1 e R 2.....	119
Tabela 12 - Resultados calculados pela matriz para as 5 primeiras aproximações para as amostras de argamassas antigas, R 1 R 2.....	130

1 Introdução

1 Introdução

Assim como nós também o património cultural sofre a acção do tempo e passa a exhibir marcas subtis ou profundas sobre si mesmo. No caso do património arquitectónico, a aparência original é alterada devido a factores internos constitucionais e agentes externos, como mudanças climáticas, fungos, a própria atmosfera reactiva e até mesmo a mão do homem que, combinados ou não, contribuem para a degradação da obra. Resgatar e preservar a integridade desse património, seja pela sua importância histórica, artística, cultural ou simplesmente sentimental, é tornar possível “a ponte que liga o mundo anterior, já abandonado e perdido, ao mundo futuro, que está a chegar e ainda não pode ser compreendido” [1].

Um dos problemas da deterioração das estruturas de construção históricas está associado à manutenção e restauro das argamassas. Este trabalho exige diversas pesquisas baseadas nos padrões internacionais de restauro, a partir das quais é possível chegar aos diagnósticos que apontam materiais e técnicas mais adequadas a cada caso específico. A principal preocupação é manter inalterado o aspecto e a qualidade, se possível com a utilização da tecnologia original, de forma a assegurar a continuidade com o passado [2].

Por isso, prever o desempenho de estruturas históricas nas quais os materiais constitutivos diferem, e muito, dos empregados hoje em dia, é de suma importância no caso dos procedimentos de restauro do património arquitectónico. Por esta razão o estudo de materiais de conservação e restauro tem sido desenvolvido como um ramo específico da ciência durante os últimos 30 anos. No entanto o progressivo desaparecimento de alguns materiais e da experiência prática de trabalhar com os mesmos, tem trazido algumas dificuldades [3].

Para que se inicie uma operação de restauro é necessário garantir a compatibilidade de resistências físico-químicas e mecânicas entre as argamassas de restauro e as antigas, não descurando o aspecto original, e tendo em conta que a reintegração deve ser reversível e de fácil reconhecimento [4]. Erros graves são cometidos em edifícios onde argamassas antigas são recuperadas com materiais modernos de tecnologias de última geração, pois muitas vezes, nestas circunstâncias, a velha estrutura nem sempre é compatível com a

nova, e podem gerar-se tensões quer devido à rigidez excessiva e porosidade reduzida própria dos novos materiais, quer devido a ciclos de expansão térmica e/ou a reacções de origem química e física como a cristalização de sais solúveis, que levam ao aparecimento de microfissuras, gradientes de pH, por onde percolam as águas pluviais, humidades, e outras fontes corrosivas que podem levar ao comprometimento da estrutura como um todo [3,5].

Desta forma, os objectivos de uma intervenção de restauro passam quer pela reposição das condições de estabilidade de todos os elementos de construção que manifestem sinais de instabilidade, quer pela eliminação de agentes causadores de degradação dos materiais, pela obtenção de melhores condições de resistência à acção dos agentes do ambiente, e pela limpeza generalizada de toda a sujidade existente.

Com o presente trabalho pretende-se definir direcções que indiquem a forma de tornar mais eficiente este processo de restauro de argamassas antigas. Em primeiro lugar irá ser evidenciado o uso dos diferentes materiais ao longo da história, estudadas as suas propriedades, vantagens e desvantagens, ao mesmo tempo que se tentam agrupar os vários tipos de argamassas de acordo com propriedades físico-químicas mais ou menos distintas.

Pretende-se então criar uma matriz que permita, partindo de algumas características da argamassa original, obter de forma imediata qual o tipo de argamassa de restauro mais adequada para a situação específica a tratar, diminuindo tempo e custos de operação que seriam inevitáveis caso se fosse analisar cada material de forma exaustiva, e possibilitando desta forma intervenções mais frequentes que evitem a degradação acelerada da estrutura. É também importante realçar que a conservação eficaz depende de uma atitude preventiva. Deve-se evitar a deterioração e não apenas corrigi-la. Este princípio conduz inevitavelmente a operações de manutenção regulares, que podem ser bastante beneficiadas com uma ferramenta de análise rápida como a que se pretende criar com este trabalho.

É então necessário uniformizar também uma lista de técnicas de caracterização que possam dar um contributo importante à criação desta matriz, técnicas estas que permitam pôr em evidência propriedades que possam diferenciar, de forma clara e rápida, os vários tipos de argamassas. Este processo deve compreender a distinção da natureza e qualidade dos materiais de origem, a observação do contributo quantitativo de cada constituinte, da

gradação dos agregados e do tipo de potenciais adjuvantes de forma a compreender as suas características reológicas e mecânicas.

Por fim é criada uma matriz genérica, que indica a metodologia analítica para a identificação de uma argamassa, realçando a diferenciação entre uma argamassa histórica, de grande importância, e para a qual a análise deve ser bem cuidada e aprofundada, e uma argamassa de menor importância histórica, para a qual deve ser ponderado o real valor da obra e ajustada a caracterização. É tendo em conta estas argamassas de menor valor histórico que se desenvolverá o trabalho experimental e a criação de uma matriz informatizada, que é igualmente do interesse da empresa de argamassas pré-doseadas Weber Cimenfix, sediada em Aveiro, que também contribuiu para o desenvolvimento deste projecto.

A parte experimental deste trabalho vai assim promover o desenvolvimento desta matriz, e testar a sua eficácia. Depois de definido o procedimento a adoptar para a concepção da matriz, esta será finalmente informatizada, de forma a que na próxima utilização seja apenas necessário introduzir os dados mais relevantes da caracterização de uma argamassa antiga. Ao mesmo tempo será criada, a partir de um conjunto de argamassas preparadas em laboratório, a base de dados da matriz. Estas argamassas serão produzidas tendo em conta os materiais e algumas das técnicas mais utilizadas para o fabrico de argamassas.

Por fim, serão caracterizadas argamassas antigas, para as quais serão indicadas, por intermédio da matriz criada, as argamassas de reabilitação mais adequadas, e algumas de constituição química e traço conhecidos, que servirão para testar o grau de fiabilidade da matriz.

A argamassa de restauro poderá ser então preparada com a constituição química e com o traço indicados, e será depois ajustada com características físicas e mecânicas semelhantes às da argamassa antiga.

2 As Argamassas

- 2.1 Argamassas de alvenaria**
- 2.2 Argamassas para estuque e reboco**
- 2.3 Argamassas de suporte para pavimentos**
- 2.4 Evolução das argamassas**

2 As Argamassas

Uma argamassa pode ser considerada como uma rocha artificial, constituída por fragmentos de rocha de dimensões relativamente pequenas, agregadas por um ligante que mantém a forma do conjunto e lhe confere solidez. A água, a areia ou outros agregados são misturados com minerais naturais que permitem produzir a “rocha artificial”. O *design* da argamassa é normalmente baseado na premissa que os vazios existentes no volume de agregados (geralmente rondam 25-40%) devem ser preenchidos com ligante, geralmente gesso, cal ou cimento, que vai também proporcionar coesão à mistura final [6,7].



Fig. 1 – Constituintes comuns de uma argamassa: agregados, ligantes de gesso, cal ou cimento e água.

No fabrico de argamassas podem também utilizar-se adjuvantes ou aditivos para lhe conferirem algumas características que facilitem a sua aplicação, tais como o retardamento ou a aceleração de presa, o aumento da trabalhabilidade ou da adesão.

Durante todo o período de utilização, os encargos de conservação são muito baixos para as suas capacidades de resistência a cargas pesadas e ao desgaste, mesmo quando sujeitas a uma grande amplitude de condições atmosféricas. Com custos globais reduzidos, quando comparados com outras tecnologias, as argamassas podem desempenhar muitas funções como materiais resistentes, com grande facilidade de aplicação, com valor estético e propriedades de resistência ao fogo e ao ataque químico, para além das suas capacidades de isolamento térmico e acústico.

Como as argamassas são materiais que apresentam um vasto grupo de propriedades “apetecíveis”, elas são utilizadas em diversas aplicações, que exploram algumas características em particular. Várias referências históricas, e muitos estudos que se têm realizado em torno das argamassas, referem o uso milenar deste tipo de materiais actuando como isolante para cisternas, aquedutos, diques, depósitos, etc, como material de suporte para pavimentos e mosaicos, como estuque, interior ou exterior, para suporte de pinturas e frescos (reboco) ou como materiais de junção em estruturas de alvenaria. Podem distinguir-se três grandes grupos de argamassas: de alvenaria, de revestimento (estuque e reboco), e de suporte para pavimentos [4,7].

2.1 Argamassas de alvenaria

A principal função de uma argamassa de alvenaria é garantir uma união estável entre estruturas (tijolo ou outros), ao mesmo tempo que contribui com a sua capacidade de isolante térmico e acústico. Os seus principais requisitos são resistência, boa aderência às estruturas e capacidade de acomodar movimentos devidos a tensões mecânicas e variações térmicas e de humidade. Carrington e Swallow [8] realçam a importância da argamassa ser mais fraca e porosa que a estrutura, tendo assim uma função de sacrifício em caso de danificação localizada.



Fig. 2 - Argamassa de alvenaria (união de estruturas)

No entanto, argamassas mais fracas possuem menor durabilidade, principalmente em condições de grandes alterações climáticas em que se verificam ciclos gelo-degelo ou de cristalização de sais. A qualidade de uma argamassa para este tipo de aplicação é, por isso, avaliada tendo em conta quer a sua resistência e o tempo que demora a desenvolvê-la, quer

a sua durabilidade para as condições de exposição esperadas. Estas argamassas são normalmente baseadas em cal ou, principalmente na actualidade, em cimentos [7].

2.2 Argamassas de revestimento

As argamassas de revestimento podem dividir-se em argamassas de estuque e de reboco. Como reboco, as argamassas providenciam uma superfície protectora, plana e regularizadora, que pode eventualmente receber um tratamento decorativo final. As argamassas de reboco podem variar consideravelmente em resistência e porosidade, mas na prática são preferidas aquelas que têm a capacidade de absorver e libertar vapor de água.

Além disso uma argamassa não deve ter uma capacidade de retenção elevada, pois a presença permanente de água na estrutura pode danificá-la; por outro lado a capacidade de retenção de água não deve ser muito baixa para prevenir a absorção de água pelos elementos que constituem a alvenaria. Se a taxa de evaporação for demasiado elevada pode também levar à deterioração da argamassa [9,10].



Fig. 3 – Argamassa de reboco

Como é bastante difícil dosear uma argamassa de reboco de forma a que o revestimento seja, em simultâneo, pouco susceptível à fissuração, pouco permeável à água, bastante permeável ao vapor de água, bem aderente ao suporte, etc, já que estas propriedades estão interrelacionadas e é difícil encontrar um compromisso satisfatório a todos os níveis, os rebocos são frequentemente constituídos por várias camadas, geralmente três: as primeiras camadas com funções de aderência ao suporte, regularização e protecção, e as seguintes com funções de protecção, acabamento e decoração. Normalmente as camadas internas têm granulometria mais grosseira que as externas, e a deformabilidade e a porosidade aumentam do exterior para o interior, assegurando-se um bom comportamento às

deformações estruturais e à água. Cada uma das camadas referidas pode ainda, por sua vez, ser constituída por subcamadas. Com efeito, para a mesma espessura total, camadas finas em maior número permitem uma melhor protecção e uma durabilidade superior [9,10].

Actualmente, são também utilizados rebocos monocamada, que pretendem desempenhar as funções de um reboco tradicional em várias camadas. São aplicáveis por projecção, e por isso têm a vantagem da grande rapidez e facilidade de aplicação. A constituição é mais ou menos semelhante à dos rebocos tradicionais, com a diferença que a dosagem é feita de acordo com uma composição estudada, os constituintes são seleccionados e a mistura é corrigida com adjuvantes, muitas vezes em pequeníssimas doses, mas com efeito sensível. É um produto preparado em fábrica, bastando adicionar a porção de água necessária para formar uma pasta com a consistência pretendida. Podem ainda ser pigmentados na massa, pelo que, nestes casos, dispensam a aplicação de pintura. As desvantagens mais evidentes são, além do custo elevado, a exigência de mão-de-obra treinada, a necessidade de um planeamento de obra rigoroso, e um acabamento bastante rugoso e com uma gama de cores relativamente restrita [10].

A grande maioria das argamassas de reboco é baseada em cimento, cal ou misturas de cimento e cal ou gesso e cal, que têm a vantagem de endurecerem rapidamente, sem grande contracção na secagem. Quando o ligante é essencialmente gesso as argamassas passam a ser consideradas argamassas de estuque. A argamassa como estuque foi também usada durante várias centenas de anos, tendo como função promover uma camada protectora e ao mesmo tempo decorativa, com a resistência adequada e de fácil aplicação, e ainda hoje é utilizada em alguns países mediterrânicos. Os requisitos para uma argamassa deste tipo são idênticos aos dos rebocos, no entanto os estuques são, de uma forma geral, menos resistentes e com menor durabilidade [11].

2.3 Argamassas de suporte para pavimentos

Este tipo de argamassas é geralmente utilizado para nivelar e alisar uma superfície horizontal, preparando-a para a decoração final com pavimento ou mosaicos. O seu requisito essencial é uma elevada resistência à compressão, e os materiais que lhe podem conferir essa característica são a cal e, preferencialmente, o cimento [7].

2.4 Evolução das argamassas

Dadas as suas propriedades, as argamassas tornaram-se num material muito utilizado na construção, que tem sido objecto de alguma evolução, de forma a encontrar soluções cada vez mais engenhosas.

No antigo Egipto e Médio Oriente usava-se gesso impuro como material ligante na construção de monumentos. A cal calcinada teria sido depois usada por Gregos e Romanos e, durante séculos, foi invariavelmente o ligante mais utilizado. Descobriu-se depois que a calcinação de rochas para a produção de cal que contivessem uma certa percentagem de argila podia fornecer maior resistência ao produto final e um certo carácter hidráulico, embora discreto, isto é, com capacidade de estabelecer presa em ambientes de elevada humidade relativa, como ambientes marinhos e fluviais, e mesmo debaixo de água, sem contacto com ar [12,13].

A exploração deste carácter hidráulico levou a que se passassem a utilizar certos aditivos. Os Romanos utilizaram, entre outros, um material de cor escura existente nos arredores da bacia de Nápoles, chamada “pozzolana”, nome que vinha de Pozzuoli (uma localidade próxima daquela cidade), material esse que se revelou de particular eficácia, já que ao ser adicionado a argamassas de cal lhes proporcionavam um carácter hidráulico bastante forte, uma presa rápida e uma impermeabilidade muito interessante para ser usada como reboco exterior. Antes, já os Gregos utilizavam um aditivo do mesmo tipo, a que chamavam “terras de Santorine”; no entanto foram os Romanos que desenvolveram um grande conhecimento sobre a preparação e aplicação destas argamassas hidráulicas, difundindo-o depois para outras culturas. O nome de pozzolana foi então estendido a outros tipos de aditivos com propriedades semelhantes, como pó ou fragmentos de tijolo e de alguns cerâmicos ou cinzas vulcânicas, que foram também usados quer como ligante, quer como agregado quando em fragmentos de maior dimensão, tendo estes materiais em comum uma grande percentagem de silicatos e aluminatos, que sozinhos não apresentam carácter ligante, mas que na presença de humidade e à temperatura ambiente reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades cimentíceas, e que conferem elevadas resistência e durabilidade ao produto final [12,13,14].

Mas foi só no século XIX que, na Europa, químicos, engenheiros e construtores se começaram a interessar pelo fabrico de cimento. O ritmo da construção cresceu abruptamente, e procuravam-se materiais que adquirissem as suas propriedades e a estabilidade mais rapidamente, e que tivessem boas propriedades mecânicas. Em 1824, o inglês Joseph Aspdin regista a patente de um processo de fabrico de um ligante hidráulico à base de uma mistura de calcário e argila [6,15]. Este processo tem uma ligação muito estreita com a cal hidráulica, já que se baseia na calcinação de pedra calcária com 20 – 30% de argila, mas a temperaturas ligeiramente superiores às da calcinação para obtenção de cal [14]. O produto resultante da calcinação dessa mistura tinha uma cor semelhante à das pedras naturais da ilha de Portland, também elas com propriedades hidráulicas. O nome dessa ilha ficaria para sempre ligado à história do cimento, pois ainda hoje existe um tipo de cimento a que se dá o nome de Portland, que continua a ser muito utilizado na construção civil. O cimento obtido por Aspdin tinha ainda fracas propriedades, pois não era mais que uma cal hidráulica, mas a sua patente deu-lhe a prioridade para o uso do termo cimento Portland, embora o seu cimento não seja igual ao usado actualmente [16].

O desenvolvimento do cimento foi feito num ambiente muito competitivo, e muitas foram as personalidades que contribuíram para ele, introduzindo várias mudanças ao processo proposto por Aspdin. O próprio filho de Joseph Aspdin, William Aspdin, foi o primeiro a conseguir, pensa-se que acidentalmente, um cimento mais resistente derivado das elevadas temperaturas de calcinação, que permitiam uma fusão parcial dos constituintes, o que formava os componentes que, como se sabe actualmente, mais contribuem para o aumento da resistência mecânica [16]. Desde então várias alterações e novas tecnologias foram introduzidas até se obter o cimento Portland tal como hoje o conhecemos.

Esta variedade e outros cimentos modernos (criados basicamente por alteração das proporções dos constituintes na mistura e das temperaturas de calcinação e pela adição de alguns aditivos) foram substituindo sequencialmente ligantes como a cal ou o gesso, pois produzem misturas com boas propriedades de aplicação, tempos de presa e endurecimento menores e resistências mecânica e a alterações climáticas muito elevadas.

Actualmente, existe a noção que argamassas à base de cal, de vários tipos e propriedades, podem ainda ter um papel relevante na indústria de construção civil, para a construção de um certo tipo de novos edifícios e para aplicações em conservação e restauro. Este facto

deve-se, para além de questões energéticas e ambientais, a algumas propriedades dos cimentos poderem revelar-se desfavoráveis em certas circunstâncias, como serem um pouco quebradiços, possuírem uma elevada resistência e terem um coeficiente de expansão térmica que pode chegar a ser o dobro do coeficiente de expansão térmica das argamassas de cal e de muitos tijolos e rochas ornamentais [17]. Além disso, vários estudos têm verificado que argamassas de materiais antigos apresentam um desempenho surpreendentemente bom, e que conseguem manter as suas propriedades por muitos anos. Apesar de serem materiais muito porosos, as suas capacidades de resistência e protecção eram asseguradas essencialmente através da espessura, e certos mecanismos de degradação eram evitados porque o sistema poroso evitava uma permanência prolongada da água na estrutura e facilitava a sua evaporação para o exterior [10]. As atenções estão por isso focadas nas potencialidades da performance de argamassas de cal hidráulica ou aérea e nas vantagens do uso de certos aditivos pozolânicos.

Outro tipo de aditivos pode também ser utilizado em argamassas com o objectivo de modificar e/ou melhorar algumas propriedades deste tipo de materiais, nomeadamente a trabalhabilidade ou a resistência, e também estes aditivos passaram por um processo drástico de evolução. Antigamente os produtos que se utilizavam com esta finalidade eram substâncias naturais, que poderiam ser cabelo, sangue, ovos, banha, sumo de frutos ou até estrume [10,18]. Actualmente os aditivos utilizados são produtos obtidos industrialmente, como cinzas e escórias de alto forno para adição em cimentos ou outros produtos mais elaborados como polímeros orgânicos, resinas acrílicas, etc, que neste caso, e para melhor compreensão, passam a chamar-se adjuvantes, como é referido no Dicionário Técnico de Argamassas Europeias, que é um documento de referência para fabricantes, laboratórios, institutos científicos, etc, e na Norma Europeia EN 998 “Specification for mortar for masonry”, Partes 1-2, 2003. [19,20].

3 Propriedades e Constituintes das argamassas

3.1 Agregados

3.2 Ligantes

3.2.1 Ligantes de gesso

3.2.2 Ligantes de cal

3.2.3 Ligantes de cimento

3.3 Adjuvantes

3 Propriedades e constituintes das argamassas

Como já foi referido, as argamassas são constituídas essencialmente por agregados e ligantes. Obviamente, o tipo de materiais utilizados influencia as propriedades da argamassa, dependendo principalmente do tipo de aplicação e não apenas da época histórica em que as argamassas são aplicadas [13,21,22,23]. Existe também correlação com o local de onde são obtidos os materiais, com a facilidade de extracção e quais os constituintes minoritários e contaminantes que as rochas de origem podem apresentar.

Outro aspecto importante a ter em conta na preparação de argamassas é a proporção de cada um dos constituintes na mistura. As principais razões do uso de agregados em argamassas relacionam-se com a estabilidade dimensional e a resistência elevada que proporcionam à mistura, com a vantagem de serem inertes (embora a interface entre a matriz ligante e os agregados seja geralmente a fase mais fraca da mistura e onde geralmente se iniciam reacções de degradação), não hidratam e, também por esta razão, não apresentam alterações dimensionais durante e depois da aplicação. O objectivo da adição de ligantes é, através das ligações formadas com os agregados nas interfaces, garantir a coesão do conjunto e preencher os vazios existentes entre os agregados, no entanto este é um parâmetro crítico na medida em que existe um rácio considerado “óptimo”. Se, por um lado, o enchimento com ligante for exagerado, haverá demasiada contracção do ligante durante a secagem da argamassa, o que poderá levar à fissuração da argamassa, como se observa na Fig. 4; por outro lado, se o ligante não existir em quantidade suficiente, haverá demasiada porosidade, o que vai enfraquecer a argamassa.

Desta forma, a proporção ideal será aquela que utiliza o volume exacto de ligante para preencher os vazios entre os agregados, com um mínimo de líquido que garanta a hidratação do ligante e uma boa trabalhabilidade (geralmente 20-25% de água relativamente à massa do ligante), pois a água evapora na secagem deixando, ela própria, vazios na argamassa, além de promover a retracção. John Warren [6] refere que num volume de agregados angulosos compactados, cerca de uma quarta parte desse volume são vazios. Uma das composições mais utilizadas envolve uma parte de ligante para três de

agregado (1:3). Este valor é o mais citado na literatura relacionada, por autores como Moropoulou *et al* [24] ou Constantinides [25].



Fig. 4 – Fissuração de uma argamassa devido à contracção do ligante durante a secagem [26].

Este rácio, no entanto, não foi sempre uma referência para os preparadores de argamassas, que imprimiam a sua própria experiência pessoal durante a mistura, e podem encontrar-se alguns estudos que referem argamassas com rácios ligante:agregado diferentes do mencionado. Além disso, o rácio vai depender também da forma, granulometria e compactação dos agregados, do tipo de ligante e da maneira como este preenche os vazios, e finalmente do tipo de aplicação da argamassa. De qualquer forma, este pode ser considerado um valor guia para a preparação de argamassas actuais, dado o bom compromisso porosidade/propriedades mecânicas que esta proporção confere. Para argamassas de restauro é conveniente a preparação de rácios idênticos aos da argamassa original, para que as propriedades mecânicas sejam semelhantes.

3.1 Agregados

Os agregados, geralmente areia e algum cascalho em menor percentagem, ou em alguns casos brita ou cerâmicos fragmentados, são geralmente o componente maioritário das argamassas, e por isso qualquer variação na sua qualidade vai ter um efeito considerável nas propriedades finais do material. A natureza inerente a agregados, como a inércia química, o baixo coeficiente de expansão térmica e durabilidade são importantes, mas a forma e a gradação das partículas têm uma influência essencial. Outro aspecto importante é a percentagem e tipo de contaminantes, que por sua vez dependem do local de extracção.

Os agregados naturais são geralmente constituídos por partículas arredondadas e lisas, enquanto que os agregados gerados pelo esmagamento de rochas são angulosos, o que produz argamassas com melhor empacotamento entre partículas, logo com menor porosidade e maior resistência mecânica. A capacidade de retenção de água e consequentemente, a trabalhabilidade são igualmente favorecidas (note-se que, como mencionado na secção 2.2, uma capacidade de retenção de água muito elevada não é um factor completamente vantajoso [9,10]). Estas características são também melhoradas se a distribuição dos tamanhos de partículas for alargada [6,7,15,27], como se observa na Fig. 5.

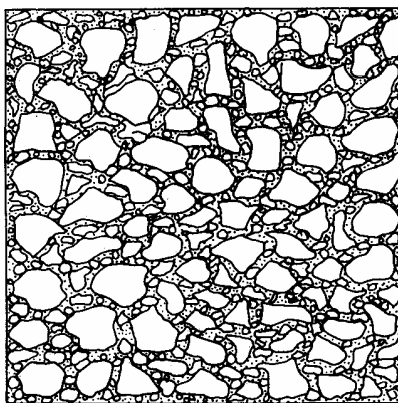


Fig. 5 - Ilustração que demonstra o efeito do uso de agregados com uma distribuição de tamanhos alargada. Os espaços entre partículas de maior dimensão são preenchidos com partículas mais pequenas.

A durabilidade está também relacionada com a porosidade, na medida em que a resistência a ciclos gelo-degelo e de cristalização de sais é aumentada se a porosidade for diminuída, mas mantendo um certo número de poros com um diâmetro largo ($> 2 \mu\text{m}$) [28]. Poros muito pequenos implicam maiores pressões em condições de tensão mecânica.

No entanto, à medida que a porosidade decresce, ocorrem fenómenos concorrentes que levam a uma redução da resistência mecânica pois, por um lado, impede-se a carbonatação em argamassas à base de cal (o estabelecimento de presa depende da transformação de portlandite em calcite, $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$) e, por outro lado, podem surgir tensões localizadas devido ao tamanho reduzido dos poros e, conseqüentemente, microfissuras [28]. Conclui-se então que, no geral, uma distribuição de tamanho de poros favorável e uma porosidade reduzida são desejáveis, desde que esta última não seja quase nula.

A areia e o cascalho são, como já referido, os agregados mais utilizados nas argamassas de construção civil. A ASTM define a areia natural como o agregado fino resultante da desintegração ou da abrasão de rochas sedimentares, ígneas ou metamórficas, devendo passar quase inteiramente no crivo de 4,5 mm [15]. Vários estudos mostram que os agregados utilizados em argamassas de construção civil apresentam maioritariamente partículas entre os 0,150 e 0,250 mm [21,22,29]. Por sua vez, o cascalho natural é definido como o agregado grosseiro resultante da desintegração ou da abrasão do mesmo tipo de rochas, devendo ser retido quase inteiramente no crivo de 4,5 mm [15]. Este tipo de agregado é, no entanto, encontrado em argamassas em percentagens muito pequenas.

Quanto à composição, normalmente a areia e o cascalho são constituídos predominantemente por quartzo que, sendo mineral frequente na maioria das rochas granulares, pela sua dureza, durabilidade e insolubilidade é um componente desejável nos agregados finos. Associados ao quartzo encontram-se outros minerais e componentes não minerais em menor percentagem, como calcite, micas, feldspatos, minerais argilosos e matéria orgânica, que podem diminuir a qualidade do agregado. No entanto é também frequente encontrar areias calcárias como agregados em argamassas (geralmente resultantes do esmagamento de rocha calcária), ou misturas de areias siliciosas e calcárias.

No que se refere à exploração, a areia e o cascalho podem resultar quer da dragagem de depósitos subaquáticos, em rios, lagos e plataformas marinhas, quer da escavação de

depósitos continentais. Pode também fazer-se uso de explorações de pedreiras, sendo necessário efectuar o esmagamento da rocha em britadeiras, geralmente extraída em grandes dimensões. Depois de extraídos, passam por crivos de malha convenientemente larga para remoção de blocos ou aglomerados de dimensão muito grande, e devem posteriormente passar por uma fase de lavagem, para que sejam limpos de partículas contaminantes [15].

Como agregados podem ainda considerar-se os tijolos ou cerâmicos fragmentados, que provêm do esmagamento de peças cerâmicas que contêm uma grande percentagem de argila. O uso deste tipo de agregados é já conhecido desde a Antiguidade, pois era utilizado pelos Romanos com o objectivo de incutir um certo carácter hidráulico quando adicionados a argamassas de cal. Mais referências a este tipo de produtos serão feitas na secção 3.2.2 - Ligantes de cal.

Nos últimos anos começaram a explorar-se outro tipo de agregados para uso em argamassas e principalmente em betão. Resíduos da indústria extractiva mineira ou da indústria cerâmica, escórias de alto forno, betão reciclado e agregados de baixa ou elevada densidade são bastante explorados quer por representar uma boa alternativa económica, quer para atingir algumas propriedades em particular, como menor peso ou características térmicas especiais. Até mesmo o conceito do uso de plásticos e resíduos domésticos como agregados está a ser bastante estudado com a finalidade de seguir os protocolos existentes actualmente sobre a redução da poluição e reutilização de resíduos [30]. Neste trabalho vai ser feita referência aos agregados de baixa densidade, também chamados de agregados leves, visto serem os que têm uma presença mais significativa em argamassas.

Agregados leves, naturais ou sintéticos, são utilizados em argamassas de reboco em situações que se pretende garantir uma baixa densidade, que é conseguida pela sua estrutura de elevada porosidade. Exceptuando o pumito, que é uma rocha espumosa vulcânica já usada pelos Romanos como agregado desde a Antiguidade, a maioria dos agregados leves são sintéticos. Entre estes últimos consideram-se a argila expandida, o poliestireno expandido, a perlite (produzida a partir do vidro vulcânico argiloso) e a vermiculite (produzida a partir de mica), grânulos de vidro expandido, espumas de escórias de alto forno e cinzas volantes parcialmente sinterizadas. No entanto, o uso deste tipo de agregados implica normalmente uma descida da resistência mecânica, principalmente à

compressão, e por isso são principalmente usados para isolamento térmico ou para melhorar a resistência ao fogo [7,30,31]. O seu uso aumenta consideravelmente o teor de água de amassadura e aumenta também a retracção [10].

A densidade dos agregados leves situa-se normalmente no intervalo 500-2000 kg/m³, enquanto que a densidade dos agregados considerados de densidade normal oscila entre 2400 e 3000 kg/m³ [30]. A argamassa resultante após endurecimento tem uma densidade aparente inferior a 1300 kg/m³ [19,20]. Uma observação microscópica dos agregados leves permite distingui-los dos agregados restantes pela sua estrutura porosa.

Os agregados naturais usados na construção civil são caracterizados por baixo custo e alto peso e, por isso, existe uma tendência a explorar a zona de extracção mais próxima. Isto reflecte-se em tendências de uso de agregados que variam entre zonas do país. Portugal é um país onde os depósitos de areias são relativamente abundantes, em especial nas Bacias Terciárias do Tejo e do Sado, no entanto, a enorme distância a que ficam dos mercados consumidores limita um pouco o seu interesse económico.

Na freguesia de Rio Maior, distrito de Santarém, existe um enorme depósito de areia siliciosa que corresponde ao maior e mais importante centro produtor nacional de areias deste tipo. Igualmente no lugar de Fonte Quente e de Casal de Grelas, freguesia de Alhadas, concelho de Figueira da Foz ocorrem areias siliciosas, que são também objecto de exploração para outro tipo de indústrias, como a vidreira.

Nos limites da freguesia de Paio Pires, concelho de Seixal, e da freguesia de Palhais, concelho do Barreiro, ambas do distrito de Setúbal, encontra-se o maior centro produtor de areia para construção civil a nível nacional. A areia fina, pouco argilosa e pouco feldspática, é de cor branca, raramente amarelada (devido a uma percentagem mínima de ferro), sendo 95 % da sua composição constituída por quartzo. A península de Setúbal constitui uma zona estratégica para o abastecimento de areia para a área metropolitana de Lisboa e para toda a península. As areias são bem calibradas, e as principais impurezas, óxidos de ferro, feldspatos, micas e minerais pesados, encontram-se em percentagens mínimas ou nulas. No lugar da Agueira, freguesia de Valongo do Vouga, concelho de Águeda, podem encontrar-se areias de granulometria relativamente inconstante,

essencialmente siliciosa, contendo alguma argila e uma certa percentagem de óxido de ferro que lhe confere uma cor amarelada. Desde a localidade de Roussa de Cima até às imediações de Leiria ocorrem as designadas Areias de Roussa, bem calibradas, de cor branca e de grão fino a médio. Também no concelho de Leiria, freguesia da Barosa, podem explorar-se areias constituídas exclusivamente por grãos angulosos de quartzo, acompanhados de moscovite, alguns feldspatos e caulinite. A areia é branca e de boa qualidade.

No que diz respeito à plataforma continental portuguesa, é possível encontrar desde areias muito finas a areias cascalhentas, com alguma percentagem de componentes biogénicos (provenientes de seres vivos). De uma forma geral, os depósitos a sul do Cabo Espichel têm menor interesse, devido à reduzida dimensão das suas áreas apresentando menores teores em cascalho e à maior componente biogénica do que os depósitos a norte daquele cabo.

No caso dos agregados provenientes da britagem de rochas de grandes dimensões, as suas proveniências são bastante diferentes. A cidade de Lisboa e o seu perímetro urbano são abastecidos por pedreiras localizadas nas imediações, mais propriamente na Serra da Arrábida, Serra de Montejunto, Ota e zona do Carregado, todas elas explorando calcário. Por sua vez, a cidade do Porto e fundamentalmente o Minho, Douro Litoral e norte do distrito de Aveiro consomem agregados à base de granito (essencialmente constituído por quartzo, feldspatos alcalinos e mica), provenientes de pedreiras localizadas nos extensos maciços graníticos do noroeste de Portugal. Finalmente os agregados de quartzito (rocha metamórfica que resulta da recristalização de sedimentos muito ricos em areia quartzítica, e que pode constituir formações extensas e espessas) são explorados em pedreiras localizadas ao longo de um extenso afloramento em Mouquim (Albergaria-a-Velha, distrito de Aveiro) [15,32].

3.2 Ligantes

A classificação das argamassas em grupos e subgrupos mais ou menos distintos, divididos pelo tipo de ligante, reúne o consenso da maioria dos autores, nomeadamente Moropoulou *et al* [12,21,22] ou Warren [6], e é, sem dúvida, a distinção mais utilizada nas áreas relacionadas. As argamassas são constituídas por ligantes como cal, gesso ou cimento, e dependendo da sua composição as propriedades vão variar consideravelmente. Dentro do grupo das argamassas de cal consideram-se 2 grandes subgrupos – cal aérea e cal hidráulica. Ainda neste último sub-grupo consideram-se vários tipos de hidraulicidade, consoante ela é obtida pela adição de substâncias pozolânicas naturais, de pós e fragmentos de tijolo e outras cerâmicas (podem ser consideradas pozolanas artificiais; os pós são utilizados como ligante, os fragmentos de maiores dimensões podem ser utilizados como agregados e a reacção hidráulica com o hidróxido de cálcio dá-se nas suas interfaces) ou simplesmente pela calcinação de pedra calcária com alguma percentagem de argila.

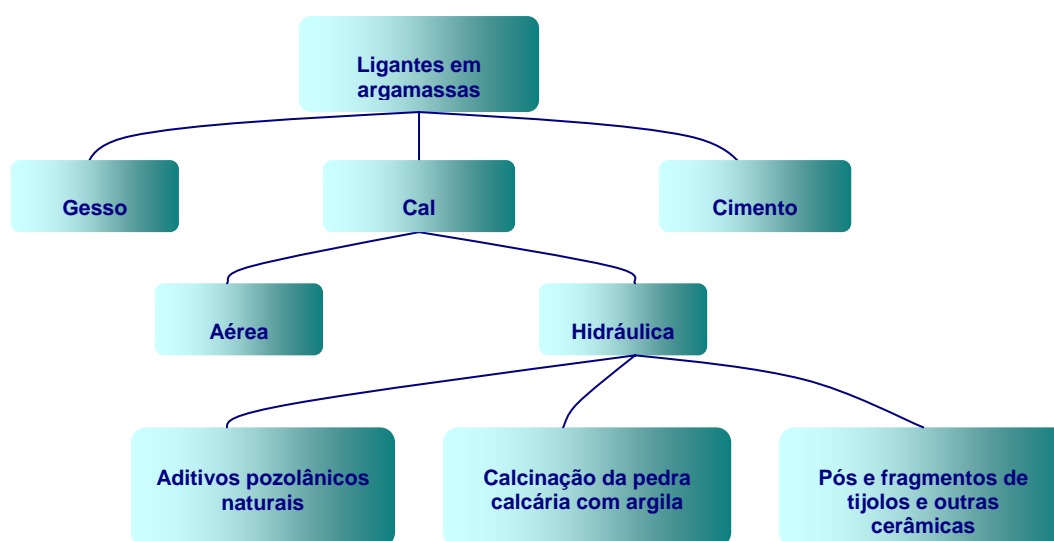


Fig. 6 - Tipos de ligantes de argamassas

Em alguns casos são ainda utilizadas misturas entre cal e gesso ou cal e cimento, denominadas argamassas bastardas, de forma a poder aproveitar as propriedades mais interessantes de cada constituinte.

3.2.1 Ligantes de gesso

O gesso é usado em argamassas desde há muito tempo devido à facilidade de produção e à sua capacidade de endurecer rapidamente, que está relacionada com a acção coerente de presa da água de cristalização. O gesso é sulfato de cálcio, CaSO_4 , que ocorre na natureza na forma hidratada, com cada molécula de sulfato de cálcio a suportar duas moléculas de água como parte da sua estrutura cristalina ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). A temperaturas relativamente baixas, 120 – 150 °C, a água é parcialmente evaporada, ficando apenas uma molécula de H_2O ligada a duas moléculas de CaSO_4 . Este hemi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) existe como um pó branco, conhecido como *Plaster of Paris*, e com a adição de água ele recristaliza, expandindo ligeiramente, e formando o hidrato original, que é um sólido rígido. Enquanto este processo ocorre, e à mesma velocidade, dá-se uma presa muito rápida (tão rápida que em algumas situações pode tornar-se prejudicial) que proporciona uma adesão rígida à estrutura poucos minutos após a colocação da argamassa [6].

Se o gesso for calcinado a temperaturas mais elevadas, acima de 350 °C, a água é totalmente evaporada, formando-se um composto chamado anidrite, CaSO_4 . A transformação novamente para gesso por hidratação da anidrite é um processo que não tem lugar caso não exista um composto catalizador que crie uma atmosfera reactiva. Este composto é o óxido de cálcio, CaO , formado durante a calcinação, que quando hidratado forma hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , uma base que acelera a formação do gesso. A velocidade de presa e a sua durabilidade dependem, neste caso, do conteúdo de óxido de cálcio livre produzido no processo de calcinação. Este por sua vez vai depender do tempo e temperatura de calcinação (quanto maior o tempo e mais elevada a temperatura, maior a quantidade de óxido de cálcio) [33].

A qualidade de presa rápida do gesso, juntamente com a facilidade de obtenção e baixas temperaturas de produção, foi determinante para o uso do gesso como constituinte preferencial de argamassas durante muitos anos, apesar das suas duas grandes desvantagens – baixa resistência e solubilidade nas águas pluviais. A sua utilização está, portanto, mais vocacionada para climas secos ou para o interior de edifícios, como reboco, ou aproveitando a sua presa rápida, para revestimentos multi-camada (primeiras camadas).

O gesso apresenta ainda a vantagem de expandir ligeiramente durante a presa, o que evita problemas relacionados com a contracção.

Uma forma bastante utilizada com o objectivo para minorar algumas das desvantagens referidas é usar misturas de gesso e cal. Balanceiam-se assim as vantagens dos dois materiais, podendo obter-se rebocos altamente efectivos, de endurecimento rápido, resistentes e sem contracção na presa. O gesso é também utilizado para a produção de cimentos, de forma a desacelerar a presa demasiado rápida destes materiais. O aparecimento de outro tipo de ligantes, mais resistentes e de maior durabilidade, contribuiu para diminuir o uso do gesso, e actualmente é raro encontrá-lo como componente único num ligante de argamassa.

A produção de gesso em Portugal é reduzida. Os depósitos são sempre de pouca monta, em que veios gipsíferos e algumas massas gipsíferas quase puras se intercalam em margas gipsíferas. As duas maiores explorações são as de Soure e Loulé, e existem ainda as ocorrências em Figueiró dos Vinhos, Leiria e Óbidos. O gesso em Portugal debate-se com problemas de falta de qualidade, o que limita as suas aplicações. É satisfatório para aditivo de cimentos. Quando existem aplicações de maior valor acrescentado, como o estuque de grande valor arquitectónico ou, por exemplo, para fins medicinais, recorre-se à importação, principalmente à vizinha Espanha [15,32].

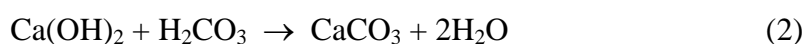
3.2.2 Ligantes de cal

Uma característica que divide, antes de mais, as argamassas de cal é a sua hidraulicidade, que reflecte a capacidade de uma argamassa estabelecer presa debaixo de água, sem contacto com o dióxido de carbono da atmosfera. As argamassas de cal são geralmente consideradas não hidráulicas, embora possam apresentar carácter hidráulico se tiverem sido adicionadas de algumas substâncias pozolânicas, ou quando a quantidade de argilas ou silicatos na rocha de origem exceder 10% em massa, como em algumas rochas calcárias, mármore (rocha calcária metamorfozizada) ou conchas de moluscos [34,35].

De uma forma geral o constituinte maioritário da rocha calcária é a calcite, CaCO_3 , mas contém também dolomite, $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$, e quantidades variáveis de, por exemplo, sílica, SiO_2 , ou óxido de ferro, Fe_2O_3 . Se a cal for obtida a partir de rocha com menos de 5% de carbonato de magnésio é classificada de cal de elevada pureza; se a quantidade de carbonato de magnésio ultrapassar 20% a cal é classificada de dolomítica. Apesar de esta última também ter sido utilizada em construção, pode enfraquecer a argamassa, já que é mais susceptível a degradação por acção de poluentes atmosféricos, e a sua hidratação tardia leva a fenómenos de expansão que podem levar à desagregação da argamassa. Por isso não é aconselhável para propósitos de conservação [34]. De qualquer forma, o magnésio não contribui, por si, para os fenómenos de presa e endurecimento da argamassa.

Para a produção da cal, a calcite, ou carbonato de cálcio, CaCO_3 , da rocha de origem passa por um processo de calcinação, durante o qual o dióxido de carbono é libertado, ficando como produto de reacção um pó branco, óxido de cálcio, CaO , muitas vezes referido como cal viva. Para tal são necessárias temperaturas entre os 900 e os 1350 °C, bastante mais elevadas do que na produção do gesso. O óxido de cálcio reage prontamente com a água para formar hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultando em cal hidratada ou pasta de cal, dependendo da quantidade de água disponível durante a reacção exotérmica. A este processo chama-se “apagar a cal”. O produto final é depois misturado com os agregados e água para formar a argamassa [6,34].

O endurecimento inicial das argamassas de cal não hidráulica deve-se à perda de água; uma parte é evaporada, outra parte é absorvida pela estrutura porosa de suporte. Durante o processo de carbonatação subsequente o hidróxido de cálcio, também chamado de portlandite, reage com o dióxido de carbono, CO_2 , dissolvido na água (água que permanece na argamassa ou água da humidade ambiental) para formar carbonato de cálcio, CaCO_3 , segundo a reacção que se descreve de seguida (Eqs. 1 e 2), o que resulta num acréscimo adicional da resistência mecânica que corresponde ao desenvolvimento de presa propriamente dito [36]. A este tipo de cal dá-se a denominação de cal aérea ou cal típica.



A reacção de carbonatação é influenciada por diversos factores, destacando-se a humidade presente, a permeabilidade da argamassa e a concentração de dióxido de carbono.

Este processo de carbonatação é, no entanto, um processo lento, e não é difícil encontrar alguns estudos de argamassas onde se verificou que nem todo o hidróxido de cálcio foi convertido em carbonato de cálcio devido a condições atmosféricas desfavoráveis, permeabilidade reduzida ou espessuras demasiado elevadas da argamassa. Alguns autores referem que uma pequena percentagem de hidróxido de cálcio não transformado pode contribuir para um incremento da resistência mecânica, mas se a quantidade de portlandite for elevada a argamassa vai acabar enfraquecida [12,21,27].

As melhores argamassas de cal aérea são obtidas se existir um período de maturação em água (cobertas de água para evitar a carbonatação) antes da colocação da argamassa [37]. Este facto deve-se ao incremento da homogeneidade e trabalhabilidade do material, que por sua vez está relacionado com a coerência do arranjo entre as partículas quando estas estão em água. Todas as argamassas beneficiam se houver um bom processo de mistura entre os componentes mas a trabalhabilidade da argamassa depende, em primeiro lugar, da capacidade das partículas poderem deslizar umas sobre as outras e sobre as superfícies adjacentes sem interferências mútuas. Além disso, este processo assegura que a hidratação da cal seja completa, o que vai aumentar a resistência da argamassa.

As argamassas de cal aérea foram utilizadas durante séculos, dada a sua fácil obtenção. O seu potencial de eflorescência (depósito natural de sais minerais à superfície resultante da evaporação das águas) é baixo, o que se deve à sua pureza relativamente elevada, é bastante permeável à água e vapores, e permite movimentos limitados da estrutura sem criar tensões. No entanto, estas argamassas também apresentam alguns inconvenientes, que passam pelos tempos de presa e endurecimento lentos (o que no entanto favorece a sua aplicação), principalmente em climas de elevada humidade, contracção volumétrica durante a presa que pode gerar tensões críticas e fractura, especialmente em grandes volumes, propriedades mecânicas médias / baixas, baixa coesão interna e elevada porosidade, tornando-a susceptível à cristalização de sais e à degradação devida ao gelo-degelo.

Sendo produzida a partir de materiais naturais, a cal pode variar no seu conteúdo, e como pequenas percentagens de sílica, alumina ou outros minerais argilosos podem alterar as

qualidades da presa, estas variações são de extrema importância. Apenas as mais puras formas de pedra calcária podem produzir uma cal suficientemente pura para a sua presa depender apenas da carbonatação ao ar. Outras pedras calcárias, mármore ou depósitos marinhos contêm uma quantidade suficiente de outros constituintes (10 a 15% de argilas) para produzir cal com percentagens substanciais de sílica ou alumina, o que vai levar a reacções químicas de presa semelhantes às dos cimentos quando se adiciona água. Estas reacções destacam-se por permitirem que se estabeleça presa debaixo de água e, quando ocorrem na cal, esta passa a ser denominada de cal hidráulica.

Este carácter hidráulico pode também ser conseguido se à cal aérea se adicionarem certos aditivos pozolânicos. As pozolanas são substâncias naturais (cinzas vulcânicas, fragmentos de lava arrefecida) ou industriais (pós ou fragmentos de tijolo ou de outras cerâmicas) com uma estrutura amorfa ou parcialmente cristalina, formada por sílica, compostos alumino-silíciosos ou uma combinação de ambos, que resultam de uma queima a temperaturas de cerca de 600-900 °C. A estas temperaturas estes compostos, que eram cristalinos, perdem a água estrutural e formam uma estrutura caracterizada pela desordem. Estes materiais não endurecem quando misturados com água, mas têm a propriedade de, na presença de água poderem reagir com o hidróxido de cálcio da cal à temperatura ambiente para formar silicatos e aluminatos de cálcio hidratados – CSH (silicato de cálcio hidratado) e CAH (aluminato de cálcio hidratado)¹, que originam um incremento da resistência mecânica durante a presa relativamente a argamassas de cal tradicional [38]. Caso a argamassa hidráulica esteja a estabelecer presa ao ar ela vai ainda passar por uma fase a médio / longo prazo em que a sua resistência vai aumentar mais um pouco, devido à carbonatação do hidróxido de cálcio. Os fragmentos e pós cerâmicos conferem um carácter moderadamente hidráulico às argamassas, enquanto que as cinzas vulcânicas, fragmentos de lava e pós de tijolo são pozolanas mais fortes, ou seja, proporcionam um carácter hidráulico mais pronunciado. Por sua vez, as argamassas hidráulicas que resultam da calcinação de rochas com argilas são as que têm menor hidraulicidade [39].

¹ Abreviaturas usadas na química dos cimentos e argamassas: C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; H = H₂O.

As principais vantagens da adição deste tipo de substâncias a argamassas de cal são o aumento da resistência mecânica e a diminuição do tempo de presa, mesmo debaixo de água. Entretanto algumas propriedades são sacrificadas, nomeadamente a capacidade de suportar deformações, a permeabilidade à água e a vapores vai também diminuir e a presença de alguns sais solúveis pode levar à formação de eflorescências e processos de dissolução-cristalização de sais que podem induzir algumas tensões na argamassa (estes factores dependem essencialmente da composição química, já que a redução da porosidade vai favorecer a resistência da argamassa a estes tipos de degradação).

As misturas de pozolanas e cal continuam ainda hoje sob investigação, já que o entendimento do processo e quais as variáveis que mais o afectam não está ainda completamente dominado. No entanto várias conclusões podem desde já destacar-se [6,38,39,40]:

- ✓ De todos os aditivos pozolânicos o mais efectivo, ou seja, o que origina mais vantagens quando adicionado a argamassas de cal é a pozolana natural (terras de proveniência vulcânica), seguida do pó de tijolo finamente pulverizado (maior área superficial específica, logo maior área propícia a reacções hidráulicas) proveniente da queima a 600-900 °C.
- ✓ Pós de tijolos refractários ou de tijolos processados a altas temperaturas são mais suaves mas satisfatórios (excepto se a sua produção ocorrer a temperaturas demasiado elevadas), e todas as formas de tijolo pulverizado são mais efectivos se usados em volume igual ou maior que o da própria cal.
- ✓ Nem todos os cerâmicos fragmentados ou pulverizados são pozolanas efectivas devido às suas composições químicas, fracas em compostos alumino-siliciosos, e às temperaturas de processamento demasiado elevadas.
- ✓ Hoje em dia muitas pozolanas naturais não apresentam a reactividade necessária para serem usadas como aditivo pozolânico e, por isso, são privilegiadas as pozolanas artificiais.
- ✓ Devido à sua alta temperatura de processamento o cimento Portland não actua como pozolana, a não ser em quantidades substanciais, isto é, acima de metade do

volume da cal, quando o efeito do cimento passa a ser dominante. Em quantidades vestigiais, ou volumes pequenos, os cimentos vão enfraquecer a argamassa no final da presa.

A adição de reduzidas quantidades de cimento a argamassas de cal vai ter um efeito negativo na resistência e na durabilidade, pois a estrutura porosa que se forma vai ser deficiente (alguns poros de menor diâmetro), tornando a argamassa mais susceptível à deterioração por ciclos gelo-degelo e por cristalização de sais (sais solúveis geralmente presentes nos cimentos). Na prática, misturas com rácios menores que 1:2:12 (cimento:cal:agregado) devem ser evitadas. Se as misturas forem mais fortes, como 1:2:9 ou 1:1:6, a durabilidade é favorecida, mas a permeabilidade da argamassa à água e vapores diminui, e a argamassa resultante torna-se muito mais dura e quebradiça. No entanto, por vezes as argamassas de cal podem não apresentar durabilidade aceitável em certas condições climáticas e torna-se necessário melhorar essa propriedade. A decisão de adicionar cimento a argamassas de cal deve ser sempre ponderada tendo em conta as características da estrutura e as condições atmosféricas a que a argamassa vai estar sujeita. Aditivos pozolânicos podem ser uma alternativa mais eficaz. Por outro lado é mais comum adicionar-se uma pequena percentagem de cal hidratada a argamassas de cimento - areia, de forma a produzir um material mais macio [6].

As argamassas de cal têm a particularidade de poderem ser utilizadas com vantagem em qualquer um dos tipos de argamassas. Além de serem utilizadas como junção em alvenaria ou como suporte para pavimentos, fazendo uso das suas propriedades de resistência mecânica, são também usadas como reboco, aproveitando a estética agradável, a porosidade (permeabilidade a vapores de água) e a resistência.

A cal é obtida essencialmente a partir da calcinação de rocha calcária ou, numa percentagem muito pequena, de calcários marinhos. Em Portugal ocorrem vastas extensões de rochas calcárias com quantidades variáveis de outros constituintes que são objecto de intensa exploração, já que o calcário é utilizado por várias outras indústrias que não a de construção civil, como a indústria farmacêutica, do papel, dos plásticos e borrachas, etc. A principal região consumidora de calcário é a de Lisboa, que consome calcário de pedreiras

das zonas das Serras de Arrábida e Montejunto, Ota e Carregado. As Serras de Aire e Candeeiros são também exploradas [15,32].

3.2.3 Ligantes de cimento

Hoje em dia o cimento é, sem dúvida, o ligante preferencial em argamassas, principalmente em argamassas de alvenaria. Basicamente, o cimento é produzido a partir de uma mistura de matérias primas calcárias e argilosas, que geralmente contêm óxidos nas seguintes proporções: cálcio 60-65%, silício 20-24%, alumínio 6-10%, magnésio 1% e ferro até 3,5% [6]. Estas matérias primas são cozidas de modo a obterem-se duros nódulos de clínquer, que são moídos simultaneamente com uma pequena percentagem de gesso até uma granulometria muito fina, em que a maioria das partículas se encontra no intervalo 2-80 μm . Para se originar a reacção química que conduz à clinquerização, são necessárias temperaturas de cozedura elevadas, da ordem dos 1400-1500 $^{\circ}\text{C}$, às quais ocorre fusão parcial dos constituintes [15]. O clínquer obtido apresenta-se sob a forma granular, com partículas variando de diâmetro entre 3-20 mm, possuindo 20-30% de fase vítrea. É um produto duro, e devido ao seu teor em ferro tem habitualmente cor escura [15]. Quando ao clínquer moído é adicionada água ele endurece muito rapidamente, sendo por isso adicionado gesso numa proporção de 3-5% que funciona como retardador de presa [15,41].

O processo de formação do clínquer inicia-se quando os componentes fundamentais das argilas reagem com o óxido de cálcio derivado do calcário, dando origem a silicatos e aluminatos de cálcio, especialmente silicato tricálcico, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$, também conhecido por C_3S , silicato dicálcico, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$ ou C_2S , juntamente com menores quantidades de aluminato tricálcico, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$ ou C_3A e aluminoferrite tetracálcica, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$ ou C_4AF . Às temperaturas de processamento utilizadas o CaO reage quase totalmente com os silicatos e aluminatos, de tal modo que os cimentos de elevada qualidade não possuem cal livre. A Tabela 1 mostra as proporções, em média, de cada um destes componentes no cimento Portland, um dos cimentos mais utilizados actualmente, e algumas das suas propriedades significativas [42,43]. Note-se que estas são percentagens médias, e existem ainda outros componentes presentes, em quantidades muito pequenas, como óxidos de cálcio, de magnésio ou outros.

Tabela 1 – Algumas propriedades dos componentes principais do cimento Portland

Nome	Abreviatura	Proporções médias	Propriedades
Silicato tricálcico	C ₃ S	60	Desenvolvimento rápido de resistência; responsável pela resistência a curto prazo; calor de hidratação relativamente baixo.
Silicato dicálcico	C ₂ S	20	Desenvolvimento lento de resistência; responsável pela resistência a médio/longo prazo; calor de hidratação muito baixo.
Aluminato tricálcico	C ₃ A	8	Presa muito rápida; baixa resistência ao ataque químico; calor de hidratação elevado.
Aluminoferrite tetracálcica	C ₄ AF	12	Contribuição baixa para a presa ou para o desenvolvimento da resistência – fase de baixo valor hidráulico; responsável pela cor cinzenta do cimento.

Quando na presença de água, os silicatos e aluminatos de cálcio formam produtos de hidratação, constituídos por microcristais que se emaranham entre si e que com o tempo originam uma massa dura e resistente: o cimento hidratado. O produto principal da hidratação do cimento é o composto C-S-H, tal como acontece na hidratação da cal hidráulica, e esta fase é uma das que mais contribui para a sua elevada resistência mecânica. É gerada como consequência da hidratação dos silicatos de acordo com as seguintes reacções:



Outros produtos de hidratação são os compostos CAH, CAS^{*}H² (sulfoaluminato tricálcico hidratado, ou etringite, também conhecidos pela sigla Aft e monosulfoaluminato de cálcio

² C = CaO; S = SiO₂; A = Al₂O₃; S^{*} = CaSO₄; H = H₂O.

hidratado, também conhecidos pela sigla Afm, que se formam na reacção dos aluminatos com os sulfatos provenientes do gesso adicionado ao clínquer) e também o hidróxido de cálcio que, a médio/longo prazo, sofre carbonatação, contribuindo também para o aumento da resistência mecânica [44]. As características principais deste cimento que se relacionam com a sua composição química são:

- ✓ Resistência a agressões químicas. Se o cimento tiver sido bem produzido (bem compactado, sem fissuras, baixa porosidade, rácio ligante / água apropriado, etc) vai ter uma grande durabilidade.
- ✓ Elevada resistência mecânica. É principalmente conseguida pela formação de grandes proporções de gel C-S-H.
- ✓ Instabilidade volúmica. Através do processo de hidratação um cimento sofre contracção devido a uma diminuição de volume das suas fases hidratadas. Adicionalmente, a chamada retracção hidráulica também acontece devido à rápida evaporação da água.
- ✓ Calor de hidratação. As reacções de hidratação dos cimentos são exotérmicas. O rápido desenvolvimento de calor no sistema pode levar à evaporação rápida da água, o que pode levar à formação de fissuras.

Algumas destas características vão contra o uso de cimento em argamassas para restauro, excepto naqueles casos específicos em que a argamassa a reabilitar é de um edifício moderno onde este tipo de ligante já havia sido aplicado.

Existem vários tipos de cimentos, que partem de modificações na composição da mistura crua do cimento Portland com o objectivo de salientar determinada propriedade relativamente a outras, de forma a poder satisfazer certas exigências da obra. Por exemplo podem fabricar-se cimentos Portland com elevada resistência inicial, com presa e endurecimento rápidos, se se manipular a produção para que o cimento tenha, relativamente ao cimento Portland comum, uma proporção mais elevada do constituinte que mais contribui para a resistência mecânica a curto prazo, o C_3S ; podem conseguir-se cimentos de endurecimento rápido, ou cimentos aluminosos, aumentando a proporção de C_3A na mistura; cimentos de baixo calor de hidratação, frequentemente chamados de

cimentos de baixa energia (diminuindo a proporção do carbonato de cálcio na mistura crua vai baixar a temperatura de clínquerização), aumentando a proporção de C_2S ; ou cimentos resistentes aos sulfatos, diminuindo o componente que mais baixa resistência tem ao ataque químico por parte destes compostos, o C_3A . Pode ainda alterar-se a cor do cimento reduzindo a percentagem de óxido de ferro, ou seja, de C_4AF . Os cimentos com teores de ferro muito baixos, que são conseguidos usando um caulino praticamente isento de óxido de ferro, são praticamente brancos. Estes cimentos são conhecidos como Portland branco.

Para além das manipulações durante a fase de produção do cimento Portland, outras modificações nas propriedades de um cimento podem ser conseguidas com a incorporação de aditivos na mistura. A utilização destes aditivos em cimentos é actualmente uma alternativa muito importante, por se tratarem de produtos facilmente disponíveis na natureza ou manipulados industrialmente.

No entanto, como já foi referido, o cimento Portland comum é o cimento preferencial para argamassas, e apenas este será tido em conta neste trabalho para a formulação da matriz identificadora de argamassas. De qualquer forma é feita de seguida uma pequena referência aos aditivos para cimentos mais utilizados. Estes não devem ser, no entanto, confundidos com adjuvantes adicionados durante a amassadura da argamassa, destinados a alterar a reologia da argamassa, e sobre os quais é feita referência na secção seguinte.

Os aditivos mais usados são escórias de alto forno, e pozolanas, que podem ser naturais ou industriais, neste último caso englobando cinzas volantes ou sílicas de fumo. Os silicatos activos destas substâncias vão reagir com o óxido de cálcio livre formado durante o processo de presa do cimento [31,45,46].

As escórias de alto forno são subprodutos da indústria metalúrgica que se formam durante o processo de refinação de óxidos metálicos em atmosfera redutora, por adição de certos agentes, tais como calcários e dolomites, e que se separam dos materiais fundidos por apresentarem um ponto de fusão inferior. A escória de alto forno utilizada como aditivo é a escória granulada obtida habitualmente por têmpera em água. É um material homogéneo, vítreo ou parcialmente cristalino, que tem como principais componentes SiO_2 , CaO , Al_2O_3 e MgO . É um material hidráulico por si, mas hidrata muito lentamente, e por isso tem de

ser activado, o que pode ser conseguido por diversas vias: química, nomeadamente pelo hidróxido de cálcio; mecânica, por moagem; ou térmica, por tratamento em autoclave.

As cinzas volantes são os produtos recolhidos nos filtros despoeiradores electrostáticos ou mecânicos das centrais térmicas a carvão. São materiais heterogéneos e de elevada superfície específica, apresentando-se em geral sob a forma de partículas esféricas. Conforme o teor de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ são classificadas em cinzas sílico-aluminosas ou sílico-cálcicas. Como aditivos do cimento, as cinzas agem quer fisicamente, pela forma e tamanho das partículas, sobre a reologia da massa fresca, quer quimicamente pela sua pozolanicidade, que contribui para o desenvolvimento da presa e da resistência mecânica.

As sílicas de fumo são geradas no decurso da fabricação do silício metálico ou de diversas ligas de ferro-silício em fornos de arco eléctrico. A sua composição química depende do tipo de forno, da carga e da natureza do carvão, mas têm normalmente um teor de sílica superior a 95%. São materiais amorfos, homogéneos, de elevada superfície específica, apresentando-se sob a forma de partículas esféricas e de diâmetro médio 0,1-0,2 μm . A adição de sílicas de fumo ao cimento pode influenciar muito favoravelmente a resistência mecânica, leveza e durabilidade. Em contrapartida, são um material pouco abundante e relativamente caro e, devido à sua granulometria tão reduzida, a sua utilização exige grande quantidade de água de amassadura ou o emprego de adjuvantes plastificantes para manter a trabalhabilidade do cimento.

As vantagens da utilização deste tipo de aditivos incluem uma poupança de energia da mesma ordem da grandeza da conseguida com a fabricação de clínques de baixa energia, e consequentemente menores custos, uma diminuição do calor de hidratação, o que vai baixar o risco de formação de fissuras, uma contribuição do seu carácter hidráulico para o desenvolvimento da presa e da resistência mecânica (a médio/longo prazo), e também uma melhoria da resistência aos sulfatos e às reacções sílica-inertes, conseguida pela redução da percentagem de constituintes do cimento que entram nestas reacções destrutivas [31,45,46]. As reacções sílica-inertes dão-se quando se utilizam inertes com determinadas formas de sílica activa na sua composição, que reagem com os álcalis (hidróxidos de sódio, potássio e cálcio) que se formam durante a hidratação do cimento. A reactividade da sílica depende, neste caso, do grau de desordem atómica e da área superficial de contacto, sendo a reactividade máxima a da opala, que é um mineral formado a partir da sílica hidratada, de

composição $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. O produto de reacção é um gel com uma grande capacidade de absorção de água e que incha ao ponto de poder causar fractura se o cimento já estiver endurecido [30,31].

A adição de pozolanas tem ainda a vantagem de favorecer a resistência a ciclos gelo-degelo, e neste sentido as pozolanas podem ser vistas como substituintes dos agentes de inclusão de ar (aumento de porosidade compressível que permite a expansão durante a formação de cristais de gelo sem induzir tensões no cimento), de favorecer a trabalhabilidade (exceptuando no caso das sílicas de fumo) e a coesão da argamassa. Por outro lado são possíveis alguns efeitos negativos, dos quais se destaca o frequente atraso das reacções de hidratação e, consequentemente, o aumento do tempo de presa [10,47,48].

Nas secções anteriores foi feita referência ao mercado actual dos calcários e do gesso. Para a produção de cimento falta ainda conhecer a proveniência das argilas, que são necessárias quando os calcários apresentam uma baixa percentagem de compostos argilosos.

Os principais depósitos de argila comum, utilizada na chamada cerâmica vermelha, correspondem a sedimentos de carácter lacustre/palustre, relacionados com rios como o Tejo, Sado, Mondego, Vouga e Cávado. Para as argilas especiais, utilizadas como refractárias ou em cerâmica de pasta branca, são utilizados os depósitos extensos localizados entre Pombal e Leiria e de Aguada. No caso dos caulinos, existem vários depósitos explorados que se estendem desde um pouco a norte de Aveiro até Viana do Castelo, e também em Chasqueira (Alvarães), Barqueiros (Esposende), Sabrais (Peniche), Alcanede, Olho Marinho (Poiães) e Rio Maior (neste caso o caulino é um sub-produto resultante da extracção de areias siliciosas) [15,32].

As cimenteiras propriamente ditas, ou seja, os produtores da mistura que origina o cimento, situam-se geralmente próximo dos locais mais explorados para a obtenção do seu componente maioritário, que é o calcário margoso. As maiores cimenteiras portuguesas situam-se em Souselas, na Arrábida, em Maceira, Cabo Mondego, Alhandra e Loulé.

3.3 Adjuvantes

O objectivo da utilização de agentes adjuvantes é alterar algumas características de uma argamassa por acção física, química ou mecânica, sem no entanto modificar o seu aspecto visual (excepto nos casos em que a alteração visual é propositada, como com pigmentos). A quantidade de adjuvante, que deve ser adicionado durante a amassadura da argamassa, não deve ultrapassar os 5% da massa do ligante [49].

Os adjuvantes são principalmente usados em argamassas de cimento, já que estas são as argamassas mais “modernas” e mais utilizadas na actualidade, e por isso mais exploradas quanto ao controlo de propriedades. Quanto aos adjuvantes utilizados em argamassas antigas é uma tarefa muito difícil especificar quais foram os mais utilizados. O uso deste tipo de produtos baseava-se num conhecimento apenas empírico, já que não havia qualquer explicação química detalhada para as consequências da adição de determinados produtos. Sabe-se de qualquer forma que alguns dos adjuvantes utilizados eram cabelo e palha, para reforçar a argamassa, e sangue ou outros líquidos orgânicos, como sumos de frutas, para melhorar, por exemplo, a consistência, a trabalhabilidade ou a hidrofugação [18].

Impermeabilizantes ou Hidrófugos

Este tipo de produtos destina-se a obturar os capilares e a impedir, pelo menos parcialmente, a penetração de água ou a sua circulação na argamassa, por redução da tensão capilar no sistema poroso. Frequentemente têm também a capacidade de repelir a água das superfícies expostas. Assim, estes adjuvantes reduzem a capilaridade da argamassa, melhorando a sua capacidade de impermeabilização, e consequentemente reduzem o potencial de eflorescência e a degradação devida ao gelo-degelo por restringirem a quantidade de água no sistema. Quando existe fendilhamento não têm contudo, qualquer efeito. Podem limitar a aderência entre camadas e ao próprio suporte, e o seu efeito tem, nalguns casos, uma durabilidade limitada.

Os impermeabilizantes, ou hidrófugos, são vulgarmente constituídos por partículas insolúveis muito finas que vão ocupar o sistema poroso, como cinzas volantes, escórias ou

pumitos (são preferidos produtos com alguma pozolanicidade), a que se adicionam outros produtos tensoactivos. Estes agentes repelentes, em regra sais metálicos como estearatos de cálcio, zinco, alumínio ou magnésio, reagem com os iões de cálcio na fase aquosa da argamassa e precipitam como sais de cálcio insolúveis, depositando-se sobre as superfícies expostas e sobre as paredes dos capilares, aumentando o ângulo de contacto com a água e prevenindo desta forma a molhagem pelo líquido. A dosagem de produtos impermeabilizantes não deve exceder os 2% da massa do ligante [10,50,51].

Plastificantes

Os plastificantes, também chamados de redutores de água, são normalmente baseados em ácidos linhossulfanados ou hidrocarboxílicos. O seu princípio de funcionamento baseia-se na adsorção de catíons de alto peso molecular pelas partículas do ligante, que leva a uma repulsão mútua entre partículas, e consequentemente, à dispersão das partículas do ligante durante a fase aquosa da argamassa, aumentando a sua superfície específica e facilitando a sua hidratação. Este tipo de produtos aumenta a trabalhabilidade da argamassa e diminui a segregação, permitindo reduzir o teor de água de amassadura e, eventualmente, o teor de ligante, o que resulta numa menor retracção da argamassa. A argamassa fica mais densa e com maior resistência mecânica.

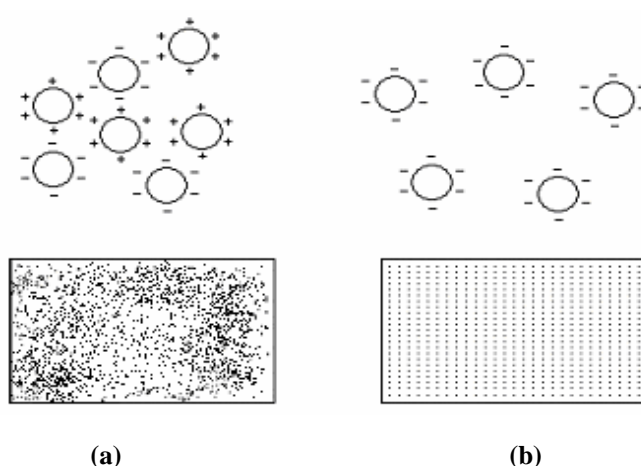


Fig. 7 – Esquema da acção dispersiva dos plastificantes: (a) partículas floculadas; (b) partículas dispersadas por efeito do plastificante, facilitando a hidratação.

Como efeitos secundários surgem o retardamento da presa, e consequentemente, uma redução das resistências iniciais. A sua acção pode por vezes ser confundida com a dos agentes introdutores de ar, já que o modo de funcionamento é muito semelhante, e alguns dos adjuvantes podem ser utilizados para qualquer um dos fins [10,31,50,51].

No domínio dos plastificantes pode considerar-se um grupo de alta efectividade, ou seja, plastificantes que permitem a redução em grande percentagem da água de amassadura ou, por outro lado, que aumentam consideravelmente a trabalhabilidade sem redução de água. Este é o grupo dos super-plastificantes. A sua acção é semelhante à descrita para os plastificantes ditos normais, mas de uma forma bastante mais pronunciada. São normalmente baseados em linhossulfanados modificados ou em formaldeídos sulfanados ou de naftaleno [31,51].

Aceleradores de presa

Os aceleradores de presa são utilizados, como o próprio nome indica, com o objectivo de acelerar a presa e, consequentemente, o desenvolvimento da resistência da argamassa. Esta característica é particularmente importante para obras de carácter urgente e para climas pouco propícios que dificultam a presa, como é o caso de climas muito frios e húmidos. O produto mais utilizado para este fim é o cloreto de cálcio, com créditos já confirmados e de fácil obtenção, que vai interferir com as reacções de hidratação dos compostos hidráulicos, mas outros tipos de compostos sem cloro são também utilizados em pequena escala. As desvantagens mais evidentes do uso deste tipo de produtos são a diminuição das resistências à cristalização de sais e ao gelo-degelo, e deve notar-se que a aceleração de presa pode ser conseguida, por exemplo, com a redução do teor de água na amassadura ou com o aumento do teor de ligante [31,51].

Retardadores de presa

Os adjuvantes que estendem as reacções de hidratação durante um período mais longo que o habitual são conhecidos como retardadores de presa. Estes produtos baseiam-se

normalmente em linhossulfanatos ou ácidos hidrocarboxílicos, e funcionam reduzindo a solubilidade dos compostos de hidratação do ligante de uma argamassa, retardando a hidratação, e consequentemente, a presa. A sua função é particularmente importante para situações de armazenamento prolongado e condições climáticas de elevada temperatura, e vai favorecer uma hidratação mais completa e uniforme da argamassa antes de esta estabelecer presa. No entanto, uma certa percentagem de água de amassadura vai acabar por ser absorvida pela alvenaria quando a argamassa está aplicada, prejudicando-a, e em casos extremos pode haver secagem da argamassa sem desenvolvimento de resistência mecânica [31,51].

Promotores de aderência

Os promotores de aderência são normalmente constituídos por polímeros sintéticos, produzidos sob a forma de látex, dos quais os mais utilizados são o acetato de polivinilo, o proprionato de vinilo, o ácido acrílico ou misturas de butadieno, estireno e acrílicos.

À temperatura de desidratação estes materiais formam um sólido polimérico que, quando combinado com ligantes hidráulicos, oferece-lhes alguns efeitos benéficos: aumentam a aderência da argamassa a qualquer substrato, aumentam a resistência mecânica e a durabilidade, reduzindo a permeabilidade e o módulo de elasticidade (o módulo de elasticidade de uma argamassa deve ser baixo para poder absorver a deformação da estrutura). Estas propriedades fazem com que os promotores de aderência sejam principalmente usados em argamassas de reboco, embora também sejam usados com vantagem como argamassas de suporte para pavimentos ou de alvenaria [10,52].

Agentes introdutores de ar

Este tipo de adjuvantes provoca a formação na argamassa de pequenas bolhas de ar fechadas, de forma aproximadamente esférica e com diâmetros da ordem de 0,01 a 1 mm. Estas bolhas, relativamente compressíveis, funcionam como um corte na capilaridade em cimentos, melhorando a capacidade de impermeabilização, a resistência a ciclos gelo-

degelo e à cristalização de sais, pois permitem compensar o aumento de volume por congelamento da água e por formação de sais.

Os agentes introdutores de ar tornam ainda a argamassa mais homogênea e trabalhável e minimizam a exsudação, o que permite reduzir o teor de água de mistura com vantagens para a resistência à fissuração. Reduzem a massa volúmica e o módulo de elasticidade, o que também contribui para melhorar a resistência à fissuração, embora sacrificando as resistências à tracção e à compressão. Podem ainda afectar negativamente a aderência.

O princípio de actuação destes adjuvantes baseia-se na formação de uma barreira insolúvel de iões em torno das bolhas de ar formadas durante a amassadura, que impede o desaparecimento das bolhas pequenas que normalmente se dá em favor do crescimento das grandes, e mantendo assim, as bolhas com diâmetros pequenos, espaçamentos baixos, e formas regulares e estáveis que conferem as características vantajosas já referidas. Os produtos usados para este fim são caracterizados por possuírem uma cadeia hidrocarbonatada com um grupo terminal polar hidrófilo e outro hidrófobo. As moléculas alinham-se radialmente da superfície da bolha de ar, com os grupos hidrófilos virados para a água de amassadura e os grupos hidrófobos para o ar, providenciando desta forma a estabilidade da bolha. Este efeito é demonstrado na Fig. 8.

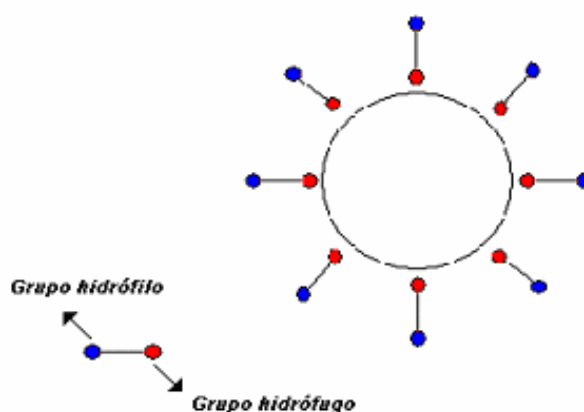


Fig. 8 – Acção dos agentes introdutores: moléculas polares rodeiam a bolha de ar, estabilizando-a.

Podem destacar-se como exemplos de agentes introdutores de ar sais alcalinos, geralmente de sódio, provenientes de compostos orgânicos tais como resina de pinheiro, ácido linhossulfanado ou ácidos gordos [10,31,50,51,53].

Fungicidas

Os fungicidas têm a função de impedir a fixação de microorganismos na argamassa, como bolores, musgos ou mesmo outras plantas superiores. Antigamente, estes adjuvantes eram constituídos por compostos orgânicos de metais pesados, como o mercúrio ou o estanho, no entanto o perigo que este tipo de produtos trazia para a saúde pública e para o ambiente fez aparecer uma nova geração de fungicidas, constituídos por compostos orgânicos com base em heterociclos azotados [10].

Pigmentos

Os pigmentos são substâncias inertes coloridas e finamente divididas que passam o seu efeito de cor à argamassa quando misturadas com ela ou quando aplicados sobre a sua superfície, sem se dissolverem. São geralmente óxidos metálicos (óxidos ou hidróxidos de ferro, de crômio, de cobalto, etc) naturais ou sintéticos, que se adicionam à argamassa em quantidades pequenas, regularmente inferiores a 10% relativamente à massa do ligante [10,52,53].

Fibras

As fibras utilizadas em argamassas de revestimento são normalmente de vidro ou de polipropileno, mas podem também ser utilizadas fibras de celulose. O uso de fibras destina-se essencialmente a aumentar a resistência à tracção e à compressão e a ductilidade do revestimento, melhorando a sua resistência ao fendilhamento. Estas fibras podem ainda influir no processo de hidratação e de carbonatação, e geralmente melhoram a coesão e a resistência à penetração de água [10].

4 A deterioração das argamassas

4.1 Dissolução de componentes das argamassas

4.2 Acção dos poluentes atmosféricos

4.3 Cristalização de sais solúveis

4.4 Efeito dos ciclos gelo-degelo

4.5 Reacções de expansão

4.6 Variações térmicas e higrométricas

4.7 Deterioração devida a causas biológicas

4 A deterioração das argamassas

A compreensão dos mecanismos de deterioração é muito importante quando se realiza a caracterização de argamassas, já que os produtos de reacção podem inibir os verdadeiros resultados do material original. Por outro lado, interessa observar a influência que estes processos têm na durabilidade das argamassas.

A deterioração das argamassas pode ocorrer através de diferentes processos químicos, físicos, mecânicos ou biológicos. Aliás, o que se observa mais frequentemente é a actuação simultânea de vários destes mecanismos de alteração e, por exemplo, processos químicos ou biológicos podem ter efeitos físicos ou mecânicos. Actualmente, vários estudos são efectuados para compreender melhor as consequências dos agentes de deterioração, o que pode ser conseguido pela observação de amostras de argamassas de edifícios antigos ou através de câmaras climáticas de envelhecimento [54,55,56,57]. No entanto, é ainda muito difícil estabelecer uma classificação geral sobre os mecanismos de degradação, e assim serão apenas destacados aqui os processos de deterioração mais comuns.

4.1 Dissolução de componentes das argamassas

Quando águas de pureza elevada, provenientes da condensação da humidade ou vapores de água contidos na atmosfera, ou águas pluviais, entram em contacto com argamassas já endurecidas, elas vão espalhar-se pelo sistema poroso do material e dissolver as fases hidratadas ricas em cálcio. Para além destas, deve considerar-se ainda a água proveniente da condensação da humidade ascendente por capilaridade, que corresponde a uma das mais frequentes formas de degradação em edifícios, devido ao longo período de permanência (geralmente toda a época das chuvas), e com afectação de todas as paredes térreas do edifício. Esta dissolução provoca um aumento da porosidade do material e consequentemente da permeabilidade, levando a um decréscimo da resistência mecânica e a um aumento da susceptibilidade ao ataque por outros agentes agressivos.

As argamassas de gesso são, como já referido anteriormente, muito solúveis em águas pluviais, não devendo estar expostas no exterior de edifícios, o que pode causar a sua

desestruturação completa. Nas argamassas à base de cal o constituinte principal, CaCO_3 , apresenta um pH moderadamente básico e, quando em contacto com a água, aproximadamente neutra, dissolve-se até ser atingido um equilíbrio. Se a água contiver dissolvido CO_2 a solubilidade da calcite vai ser ainda maior. Se restar ainda alguma portlandite, Ca(OH)_2 , que não foi carbonatada este será o constituinte mais solúvel. Estes constituintes são fases minoritárias nos cimentos hidratados, e por isso a dissolução nestes materiais é menos significativa.

O processo de dissolução de sais de cálcio pode ter outros efeitos indesejáveis do ponto de vista estético. Frequentemente o produto de reacção $\text{Ca(HCO}_3)_2$ precipita na superfície das argamassas, dando origem a eflorescências brancas de CaCO_3 [52,58].

4.2 Acção dos poluentes atmosféricos

Durante as últimas décadas o problema das chuvas ácidas tem adquirido dimensões preocupantes nas zonas mais industrializadas, como em grande parte da Europa e América do Norte. O pH desta chuva ronda os 4 – 4,5, e esta acidez deve-se ao efeito dos compostos HNO_3 e H_2SO_4 , que se formam devido a reacções do SO_2 e NO_2 com a água. Estas águas ácidas, em contacto com cimentos e argamassas, dão lugar à formação de nitratos de cálcio, sulfatos, bicarbonatos, etc, sendo alguns destes sais altamente solúveis.

De entre os poluentes gasosos o mais perigoso é o SO_2 . O grau de interacção entre o SO_2 atmosférico e o ligante das argamassas é um factor complexo ainda difícil de determinar, já que existe um conjunto de variáveis que afectam o processo e que o influenciam a diferentes níveis (concentração do gás na atmosfera, natureza do ligante, porosidade, etc). No entanto, é ponto assente que o gesso é o único composto estável formado a partir desta interacção, apesar de se formarem outros sais de sulfatos. Esta produção de gesso é consequência da oxidação e hidratação do SO_2 seguida da interacção do ácido sulfúrico formado com o carbonato de cálcio do ligante, CaCO_3 .

Ou seja, a formação de novos compostos pode ser estável ou não, e em qualquer dos casos leva a instabilidades na argamassa que podem ser bastante prejudiciais, quer do ponto de vista físico e mecânico, quer estético [13,31,54].

4.3 Cristalização de sais solúveis

A cristalização de sais solúveis no sistema poroso de uma argamassa produz muito frequentemente deterioração. Os sais produzidos são constituídos por iões existentes na água, e que foram extraídos da argamassa, da estrutura, dos tijolos, de rochas alteradas, etc. Partículas sólidas soltas na atmosfera, poluentes e produtos do metabolismo de organismos vivos podem também ser fontes de alguns iões.

Os iões penetram e circulam na estrutura porosa da argamassa sob a forma de soluções diluídas. Um sal cristaliza quando a água evapora e a actividade dos iões na solução ultrapassa a actividade de saturação, ou quando a humidade relativa da atmosfera em redor do material é inferior à do equilíbrio da solução saturada desse sal. Quer isto dizer que numa estrutura porosa contendo sais acumulados, estes vão-se dissolver ou cristalizar dependendo da humidade relativa da atmosfera.

Uma argamassa porosa e permeável vai ser mais susceptível à cristalização de sais, na medida em que admite uma maior quantidade de solução na sua estrutura e facilita a evaporação da água. No entanto, quanto mais puros forem os seus materiais de origem, isto é, quanto menos contaminantes existirem, menor a probabilidade de ocorrer cristalização de sais.

Noutra perspectiva, o ponto onde a cristalização começa a ter lugar é determinado por um balanço dinâmico entre a taxa de evaporação da água a partir da superfície e a taxa de acesso da solução até esse ponto. Se a taxa de acesso do líquido até à superfície é superior à de evaporação, a cristalização de sais dá-se à superfície, dando lugar a eflorescências que não são agressivas para a argamassa (**Fig. 9**), mas que indicam que num outro ponto interior da argamassa está a decorrer cristalização.



Fig. 9 – Cristalização de sais à superfície – eflorescências

Se por outro lado a taxa de migração do líquido até à superfície for ligeiramente inferior à taxa de evaporação, vai desenvolver-se uma zona seca logo abaixo da superfície e a cristalização de sais dá-se na interface entre a zona seca e a zona húmida, dando lugar a “flocos”, “lâminas”, etc, de sais, que causam esfoliação das camadas mais superficiais da argamassa ou a sua desintegração, como se observa na Fig. 10. Por fim, se a taxa de acesso do líquido for muito inferior à taxa de evaporação, os depósitos de sais crescem no interior do material sem que seja observada qualquer deterioração superficial - criptoflorescências.



Fig. 10 – A cristalização de sais logo abaixo da superfície pode levar à esfoliação das camadas mais superficiais de uma argamassa, bastante mais agressiva que cristalização de sais à superfície, ou eflorescências.

Durante o processo de cristalização desenvolvem-se pressões elevadas devidas ao crescimento dos cristais e à sua hidratação, principalmente quando estes ocorrem no interior da estrutura. O efeito destrutivo que estas pressões podem ter depende quer das características mecânicas quer do sistema poroso do material. A pressão da cristalização de sais é ainda inversamente proporcional ao raio dos poros, de forma que argamassas com um elevado volume de poros pequenos vão estar sujeitas a pressões capazes de fazer desagregar o material [57,59,60,61].

4.4 Efeito dos ciclos gelo - degelo

O aumento do volume específico (9%) que se dá na água quando esta passa do estado líquido para o estado sólido gera pressões na superfície dos poros da argamassa que podem levar a fissuração e fractura. As argamassas são frágeis contra este tipo de pressão, principalmente se a porosidade for elevada (maior quantidade de água na estrutura). Poros

pequenos são no entanto mais sensíveis pois colapsam mais facilmente se sujeitos a pressões elevadas [28,31,43,53].

4.5 Reacções de expansão

Hidratação do óxido de cálcio, CaO, e do óxido de magnésio, MgO

Quando os processos de hidratação da cal ou do cimento não são suficientemente intensos, o produto final pode conter alguma percentagem de CaO e MgO cristalinos não hidratados (MgO proveniente de dolomites na rocha calcária). As reacções de hidratação tardia destes óxidos são lentas e expansivas, e podem causar fissuração ou mesmo desagregação das argamassas quando estas já estão endurecidas [41].

Formação de etringite

A etringite, ou sulfoaluminato tricálcico hidratado, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$, é formada como consequência da reacção química entre aluminatos e sulfatos que podem estar presentes nos cimentos. A cristalização da etringite envolve um grande aumento de volume. Se esta reacção se der antes do endurecimento da argamassa (no início da presa o gesso adicionado ao cimento vai reagir com o composto C_3A , formando etringite sem prejudicar o desenvolvimento de presa e de resistência), quando esta ainda está num estado plástico, ela é capaz de absorver as tensões geradas por este incremento de volume. No entanto, se a etringite for formada quando o sistema já está endurecido, este fenómeno expansivo pode levar à desintegração da argamassa. As consequências deste tipo de deterioração dependem de dois factores principais: o conteúdo de aluminatos na argamassa e a quantidade e origem dos sulfatos. Assim, a melhor forma de aumentar a resistência da argamassa ao ataque dos sulfatos é reduzir a porosidade (menor quantidade de sulfatos admitidos na estrutura). Por outro lado é também importante reduzir a quantidade de aluminatos [13,31].

Formação de taumasite

A formação de taumasite pode dever-se a dois mecanismos que podem, ou não, actuar em simultâneo. Por um lado pode ser consequência da evolução da etringite pela incorporação de Si^{4+} na sua estrutura substituindo iões Al^{3+} ou pela substituição intersticial de $(\text{SO}_4)_3 2\text{H}_2\text{O}$ por $(\text{SO}_4)_3(\text{CO}_3)_2$; por outro lado pode resultar da interacção de sulfatos e carbonatos com o gel C-S-H.

O efeito destrutivo da formação de taumasite devido a expansão de volume é semelhante ao da formação de etringite, e envolve também a destruição do gel C-S-H e, consequentemente, a desagregação da argamassa [55].

4.6 Variações térmicas e higrométricas

As variações de temperatura e humidade relativa podem produzir dilatações e contracções no material, criando tensões na argamassa e mesmo na estrutura. A evaporação dá-se a diferentes velocidades, dependendo do material. Quando as argamassas são aplicadas em multi – camadas usando materiais com características distintas, técnica muito frequente em operações de revestimento, esses materiais podem ter coeficientes de expansão térmica e higrométrica diferentes. As tensões induzidas podem ser tais que resultem em fissuração ou desagregação [53,56].

4.7 Deterioração devida a causas biológicas

A biodeterioração é um processo de destruição do material por organismos vivos ou pelos produtos do seu metabolismo. O processo de colonização de uma argamassa é favorecido pelas suas características de porosidade, composição e rugosidade, já que estas podem favorecer a retenção de água no material e o consequente crescimento de microorganismos. Estes podem mesmo formar biocamadas que ajudam à retenção de areias e pós e são substratos apropriados para o crescimento de outros organismos vivos e mesmo de plantas superiores.

5 Argamassas para Restauro

5.1 Caracterização de Argamassas

5.1.1 Técnicas de caracterização discriminatórias

5.1.2 Técnicas de caracterização comparativas

5 Argamassas para Restauro

A produção de argamassas para restauro é ainda muito difícil de normalizar. Para se compreender a complexidade de encontrar uma argamassa adequada para cada aplicação específica, compatível com a original estética e funcionalmente, recorde-se a variedade de componentes e métodos que existem para a preparação deste tipo de materiais [6].

- As areias e agregados variam quer em tamanho e forma de partícula, quer em cor, componentes primários e secundários.
- Os ligantes podem ser cal, que por seu lado pode variar desde puramente aérea até um elevado carácter hidráulico e, neste último caso, é necessário ter em atenção que este carácter pode ser adquirido através da adição de um conjunto vasto de aditivos pozolânicos.
- Outros tipos de ligantes que podem ser utilizados são cimentos, que podem variar numa vasta gama de resistências e cores. O gesso pode também ser utilizado como ligante, e é também frequente utilizarem-se argamassas bastardas, com misturas de vários ligantes em proporções variadas.
- Adjuvantes e corantes podem também estar incluídos na argamassa, e até a água, ingrediente fundamental, é variável em quantidade e pureza.
- Os métodos e tempos de preparação são, de igual forma, parâmetros críticos.
- As circunstâncias de deposição, como o tipo de suporte ou as condições climáticas, vão controlar o comportamento da argamassa.

O carácter da argamassa pode, portanto, variar entre milhares de combinações possíveis, e isto reflecte-se na dificuldade em definir regras e metodologias para a preparação de argamassas de restauro. Por isso, existe um grande interesse em classificar as argamassas em grupos mais ou menos distintos, dependendo das suas características físico-químicas.

Este é um trabalho metódico, que envolve muita pesquisa bibliográfica e caracterização, mas que pode trazer muitas vantagens à comunidade que está de alguma forma relacionada com a conservação e restauro de argamassas. O objectivo é, então, criar uma matriz onde, partindo de algumas características da argamassa original, se possa visualizar de forma mais ou menos imediata qual a argamassa de reabilitação mais adequada, diminuindo tempo e custos de restauro, que seriam inevitáveis caso se fosse analisar cada argamassa de forma exaustiva.

De qualquer forma é de referir que uma intervenção do tipo substituição total deve ser sempre o último passo a seguir. A primeira opção deve ser sempre a conservação. Esta opção é a mais correcta do ponto de vista da ética de conservação, e geralmente é a que assegura maior durabilidade e menores custos. Por outro lado, existem situações em que apenas reparações pontuais são as mais indicadas, como no caso de rebocos que se encontram superficialmente degradados, mas que no seu interior estão “saudáveis”. Apenas quando a degradação atingiu um nível profundo, com perda das suas propriedades físicas e mecânicas, deve ser feita a substituição, parcial ou total, por argamassas compatíveis com as antigas [62].

No caso de se optar pela intervenção de restauro um passo que se pode tornar de grande importância para a identificação da argamassa original é o enquadramento histórico e espacial do edifício que se está a analisar. Este pormenor pode facilitar bastante o trabalho do investigador, já que certos materiais são característicos de determinadas épocas e locais [62]. Por exemplo, deve excluir-se logo de princípio a hipótese de utilização de adjuvantes químicos modernos em edifícios do século XIX que não tenham ainda passado por nenhum processo de intervenção.

5.1 Caracterização de Argamassas

Do ponto de vista científico, a caracterização de argamassas é um problema que já se considera ultrapassado, na medida em que existe um conjunto bem definido de técnicas instrumentais conhecidas que permitem obter informação relevante acerca do material em estudo. Existem actualmente diversos estudos que aprofundaram o uso de algumas técnicas aplicadas especificamente às argamassas, através dos quais foram definidas metodologias de análise que ajudam a uma compreensão mais fácil dos resultados, dos quais se destacam, por exemplo, o estudo da caracterização de argamassas por termogravimetria e difracção de raios X de Moropoulou *et al* [63] ou a análise por espectroscopia de infravermelhos de Paama *et al* [64] ou ainda a determinação da composição química de ligantes e agregados [29,39]. Muitos trabalhos são também publicados sobre exemplos de análise de argamassas de um determinado edifício, zona ou época histórica.

No presente trabalho optou-se por dividir as técnicas de caracterização em dois grupos: um primeiro grupo, onde se inserem as técnicas consideradas distintivas da argamassa, ou seja, a partir das quais é possível, analisando os resultados obtidos, identificar qual o tipo de argamassa em estudo. Estas são as técnicas que podem ser utilizadas para a construção da matriz que se pretende neste trabalho, como a difracção de raios X ou a análise térmica diferencial. Num segundo grupo podem inserir-se as técnicas comparativas, ou seja as técnicas que oferecem informação relevante das características do material mas que não chegam, por si só, para identificar a argamassa de forma explícita. Alguns exemplos são as técnicas de análise da resistência mecânica ou do coeficiente de capilaridade.

Desta forma, fazendo uso de técnicas discriminatórias, é possível definir argamassas de restauro para um caso específico; através das técnicas comparativas pode avaliar-se o comportamento das argamassas original e de restauro, e assim concluir se realmente elas são compatíveis quanto ao comportamento e durabilidade. Estes ensaios de comparação só dão resultados fiáveis se se garantirem as condições de estabilidade de comportamento da argamassa de restauro.

5.1.1 Técnicas de caracterização discriminatórias

Quando se pretende caracterizar uma argamassa existem vários factores a ter em conta para a análise, como a distinção da qualidade e natureza dos materiais constituintes, a observação do contributo em termos percentuais de cada um deles, a gradação dos agregados e o tipo de adjuvantes; estas características influenciam de forma determinante o comportamento de uma argamassa. Por isso devem escolher-se várias técnicas instrumentais que forneçam informação sobre cada um destes aspectos, comparando e complementando os resultados entre si. Para a criação da matriz deve também ser privilegiada a rapidez de análise.

Numa primeira fase, deve ser feita a determinação da densidade aparente da argamassa. A parte 10 da norma europeia EN 1015 (“Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”, Agosto de 1999) determina que a amostra de argamassa deve ser imersa em água, medindo-se a sua massa aparente depois de saturada e imersa em água, e imediatamente depois de retirada da água [65]. Este ensaio apenas permite verificar se se está na presença de uma argamassa leve ou não, e portanto só se pode considerar este ensaio como uma técnica de caracterização discriminatória nestas condições.

Seguidamente, como se pretende obter informação sobre a distribuição granulométrica das argamassas, e fazer a separação para que cada um dos seus componentes possa ser estudado em separado (muitas técnicas de caracterização são mais conclusivas se se analisar agregados e ligante individualmente), as amostras têm de ser crivadas e fraccionadas. Os crivos normalmente utilizados são os da série ISO 565, com malhas quadradas de 8000, 4000, 2000, 1000, 500, 250, 125 e 63 μm , referidos também na Norma Europeia EN 1015 - 1: “Methods of test for mortar for masonry – Part 1: Determination of particle size distribution by sieve analysis”, 1998 [65]. A crivagem pode ser feita a seco ou por via húmida. A fracção com partículas de menor tamanho é considerada ligante, embora possam ainda existir alguns grãos muito finos de agregado [21,66,67].

A análise química por via húmida pode ser também utilizada para estimar a relação entre o ligante e agregados de natureza siliciosa. O método de análise, que pode ter várias

variantes, baseia-se genericamente num ataque com ácido clorídrico ou nítrico à amostra. O ligante é definido a partir do material que foi solubilizado no ácido, e os agregados são obtidos a partir do resíduo insolúvel [68]. Esta técnica pode no entanto ser falseada caso haja presença de agregados não siliciosos, que também se dissolvem no ácido de ataque. A constituição química de ambas as partes pode depois ser analisada por intermédio de meios de caracterização química, como a volumetria ou a gravimetria. Nestes métodos a substância em análise é decomposta ou levada a reagir com outra substância de acordo com uma equação química bem definida; a medida da quantidade do produto resultante ou do reagente usado permite calcular a quantidade da substância ou do elemento em análise.

Outros métodos de análise química elementar podem ser utilizados, como a espectrofotometria de absorção atómica ou a espectrofotometria de emissão de plasma. A espectrofotometria de absorção atómica é um método de análise química que se baseia na absorção de energia radiante por átomos no estado gasoso, e a espectroscopia de emissão de plasma mede a intensidade da radiação que elementos no estado gasoso emitem quando electricamente excitados.

A microscopia óptica é uma ferramenta valiosa na caracterização mineralógica e petrográfica dos constituintes da argamassa e também na observação das suas fases minerais. É uma técnica bastante vantajosa, na medida que permite obter informação relevante, de forma rápida e pouco dispendiosa. A microscopia electrónica de varrimento (SEM, scanning electron microscopy) pode complementar essa informação com observações de maior ampliação da microestrutura e da distribuição da porosidade, e permite ainda uma análise elementar semi-quantitativa se tiver acoplado um sistema de espectrometria de radiação X (EDX, energy dispersive X-ray analysis). Estas técnicas são interessantes para a identificação do tipo e forma de agregados, e podem ser um ponto de partida para o estudo dos ligantes e adjuvantes. São também auxiliares importantes no diagnóstico dos processos de deterioração [13,14,21,68].

A mineralogia cristalina das argamassas pode também ser conhecida através da difracção de raios-X (DRX), que é uma das técnicas de caracterização que fornece informação mais valiosa. Associada ao DRX existe uma extensa base de dados (fichas ICDD), que é

continuamente renovada, e que permite a interpretação dos resultados, nomeadamente a identificação do tipo de minerais presentes e as suas fases cristalográficas, podendo-se assim tirar conclusões sobre condições de processamento (atmosfera e temperatura). Desta forma é possível distinguir tipos de agregados – areia de quartzo, calcária, plagioclases, feldspatos, etc, e ligantes com fases cristalinas – gesso, calcite, dolomite, portlandite, etc. A presença de argamassas hidráulicas pode ser identificada caso se verifiquem compostos como CSH, CAH, CAS^{*}H (embora estes compostos tenham, geralmente, uma baixa cristalinidade) ou minerais argilosos (moscovite, ilite, montmorilonite, etc). Outros compostos são característicos de argamassas de cimento, como o C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF, já que são produtos da sinterização parcial, que é própria apenas dos cimentos. Estes últimos serão apenas observados se a hidratação do cimento for incompleta. Sais resultantes de produtos de degradação podem também ser identificados [14,39,63].

No entanto esta técnica não permite, por si só, a distinção total de tipos de argamassas, já que não consegue identificar, por exemplo, certo material pozolânico, como cinzas vulcânicas, ou alguns silicatos solúveis próprios de argamassas hidráulicas, devido às suas estruturas amorfas [63]. Existem, de qualquer forma, minerais identificáveis associados a terras pozolânicas, como a analcite, leucite e diopsido [39].

Relativamente a condições de processamento dá-se como exemplo a montmorilonite, cuja estrutura cristalina é destruída aos 800 °C, e portanto deixa de ser identificada por DRX caso a argamassa tenha sido calcinada a temperaturas superiores. O mesmo acontece para a ilite acima dos 1000 °C. Pelo contrário, a presença da mulite e da cristobalite indicam temperaturas de processamento de 1000-1200 °C, já que estas fases cristalográficas formam-se apenas nesse intervalo. Os estudos das condições de processamento são particularmente úteis para o estudo da pozolanicidade de tijolos e cerâmicos [14].

As técnicas mais específicas para os ligantes passam por outro tipo de análise. A espectroscopia de infravermelhos por transformada de Fourier (FTIR) pode ser utilizada para obter informação química qualitativa sobre alguns constituintes da argamassa (carbonatos de cálcio, hidróxidos de cálcio e magnésio, gesso, etc.) e sobre a presença de sais (nitratos, sulfatos, etc.). Por exemplo a presença de calcite pode ser identificada com os picos 2520, 1795, 1440, 875, 850, 715 e 315 cm⁻¹, a portlandite nos 3642 cm⁻¹, a brucite

(hidróxido de magnésio) a 3693, 1638, 1005 e 963 cm^{-1} , o quartzo a 1165, 1090, 800, 780, 694, 520 e 400 cm^{-1} e feldspatos de potássio a 1100-1070, 1035, 690 e 670 cm^{-1} [67,69]. É uma ferramenta particularmente valiosa para a análise de produtos de degradação e de adjuvantes. Também associada a esta técnica existe uma base de dados que permite fazer a interpretação de resultados e identificar com segurança os compostos correspondentes aos picos obtidos.

A análise térmica diferencial e a termogravimetria, ATD/TG, permitem, por sua vez, obter dados qualitativos e quantitativos que complementam a informação obtida por difracção de raios-X e/ou espectroscopia de infravermelhos para alguns componentes. A análise térmica diferencial baseia-se nas transformações térmicas, endo ou exotérmicas, incluindo desidratação, desidroxilação, e decomposição. Em combinação com a termogravimetria, a perda de massa da amostra pode ser monitorizada em função da temperatura.

Em argamassas é possível observar, por exemplo, um pico endotérmico correspondente à perda de água higroscópica (fisicamente adsorvida), que se situa perto dos 120 °C. O gesso, apresenta também picos endotérmicos entre os 120-200 °C (se a quantidade de gesso for muito baixa, este é considerado como produto de degradação resultante de reacções de sulfatos, provenientes do SO_2 atmosférico, com cálcio, e não como ligante).

A água estrutural dos componentes hidráulicos, ou água adsorvida quimicamente, é identificada com picos endotérmicos de desidratação entre os 200-600 °C. Neste intervalo pode também haver outras perdas de peso associadas por exemplo a hidróxidos de cálcio e magnésio, a hidromagnesite, a compostos orgânicos, etc. A presença destes compostos tem, de qualquer forma, de ser confirmada com outras técnicas de caracterização, nomeadamente com espectroscopia FTIR.

A desidratação da portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, é detectada entre os 400 e os 520 °C. Os minerais argilosos mais comuns – caulinite, ilite e montmorilonite – são reconhecidos pelos seus fortes efeitos endotérmicos no intervalo 500-650 °C derivados da desidroxilação. Distingue-se assim uma argamassa hidráulica de uma de cal pura, já que esta não apresenta estes últimos picos.

Por outro lado, a transição $\alpha \rightarrow \beta$ do quartzo pode também ser identificada com um pico endotérmico aos 573 °C sem perda de massa associada. Alguma matéria orgânica que possa estar presente, usada como adjuvante para promover a carbonatação, a trabalhabilidade, etc, é detectada na forma de picos exotérmicos entre os 300 e os 500 °C.

Os carbonatos originam picos endotérmicos distintos: a cerca de 840 °C está representada a calcite, e os dobletos por volta dos 780 °C e dos 860 °C descrevem a dolomite; a posição pode variar um pouco, dependendo do tamanho de grão, atmosfera e outros factores que afectem a libertação de CO₂ durante o processo. Perda de massa aos 750 °C indica a libertação de CO₂, neste caso não do CaCO₃ puro, mas da calcite já recarbonatada. Esta calcite de carbonatação tem um tamanho de grão que pode ser até 20 vezes menor que o dos agregados calcários, e quanto maior a finura de partículas de uma dada substância menor é a temperatura a que se dá a sua dissociação térmica. Assim, é possível diferenciar qualitativamente estas duas formas de calcite, isto é, partindo da temperatura de início e fim da decomposição da calcite é possível verificar a existência de agregados calcários na argamassa [68].

Como o magnésio está muitas vezes presente nas argamassas de cal sob a forma hidratada, a sua desidratação é também tida em conta: a 250-280 °C pode ser identificada a hidromagnesite, a 350-420 °C a magnésia hidratada e a 450-520 °C os carbonatos de magnésio [63].

Com a ATD/TG é também possível determinar a natureza dos ligantes através de um procedimento analítico apropriado, que relaciona o dióxido de carbono perdido na decomposição da calcite do ligante e a água estrutural ligada a componentes hidráulicos (perda de peso entre os 200 e os 600 °C), permitindo assim inferir sobre o carácter hidráulico da argamassa [12,21,63,66,67]. O rácio CO₂/H₂O_{est} expressa inversamente o carácter hidráulico de uma argamassa, como se observa na Fig. 11: verifica-se que para argamassas de cal típica os rácios CO₂/H₂O_{est} são geralmente superiores a 10; argamassas com carácter hidráulico fraco apresentam rácios CO₂/H₂O_{est} próximos de 4-9; argamassas com um carácter moderadamente hidráulico (por exemplo argamassas com fragmentos de tijolo) apresentam rácios CO₂/H₂O_{est} a variar entre 3 e 6; argamassas fortemente hidráulicas (com aditivos pozolânicos naturais) têm rácios CO₂/H₂O_{est} baixos, inferiores a 3. Uma argamassa com uma grande quantidade de portlandite inalterada (que não sofreu

carbonatação) apresenta também um baixo rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$, já que a perda de água estrutural (ligada ao $\text{Ca}(\text{OH})_2$) vai também ser elevada, apesar de esta não estar necessariamente ligada a componentes hidráulicos. Este procedimento deixa, no entanto, de ser válido se a análise for feita à amostra total e existirem agregados calcários. Estes vão influenciar os resultados de maneira a que os rácios apresentados deixem de ser válidos, pois também eles vão libertar CO_2 .

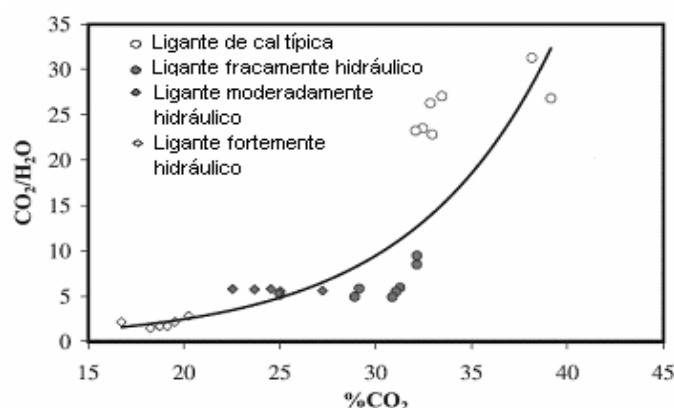


Fig. 11 - Relação típica entre a percentagem de massa perdida pela libertação de CO_2 e o rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ para ligantes de cal típica e para ligantes de variável carácter hidráulico. O nível de hidraulicidade de um ligante varia inversamente com o rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ [12].

Verifica-se que a perda de água higroscópica ($T < 120^\circ\text{C}$) pode também ser um indicador do nível de hidraulicidade de uma argamassa, já que existe uma relação directa entre esta e a água perdida derivada de componentes hidráulicos (Fig. 12) [66].

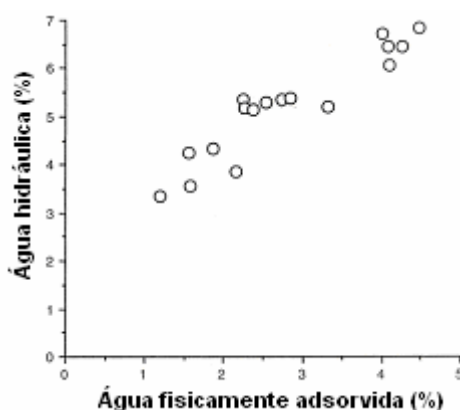


Fig. 12 - Relação típica entre a água fisicamente adsorvida (perda de massa a $T < 120^\circ\text{C}$) e a água ligada a componentes hidráulicos (perda de massa em $200-600^\circ\text{C}$). A água fisicamente adsorvida pode, desta forma, ser também um indicador do nível de hidraulicidade de uma argamassa [66].

5.1.2 Técnicas de caracterização comparativas

Certas propriedades das argamassas, como a resistência mecânica ou a porosidade, são bastante diferenciadas entre os vários tipos de materiais constituintes, no entanto existem certas condicionantes que podem modificar o seu comportamento expectável e, por isso, essas características não permitem distinguir, por si só, o tipo de argamassa da amostra em estudo. Por exemplo, a resistência mecânica de uma argamassa de cimento, que à primeira vista deve ser superior à das restantes argamassas, pode estar diminuída por variados factores, nomeadamente por ter estado sujeita a processos de degradação, visíveis ou não, ou por o seu endurecimento/presa não ter sido realizado nas condições mais favoráveis. Neste caso, os valores de resistência medidos poderiam aproximar-se ou mesmo confundir-se com valores próprios de argamassas mais fracas. Por outro lado, argamassas de cal hidráulica podem apresentar características mecânicas muito interessantes, mesmo comparáveis aos cimentos. Este é apenas um exemplo de como certas propriedades dos materiais constituintes podem não ser discriminatórias do tipo de argamassa.

Assim, das técnicas que de seguida serão descritas pode dizer-se que, embora não sejam distintivas do tipo de argamassa são, em conjunto com as técnicas discriminatórias, essenciais para compreender o comportamento deste tipo de materiais e prever a sua durabilidade. São também essenciais para comparar argamassas antigas e de reabilitação, de forma a verificar a sua compatibilidade. A maioria destas técnicas é descrita na norma europeia EN 1015 – “Methods of test for mortar for masonry”, partes 1 a 19, que rege a caracterização de argamassas de alvenaria [65]. As Fichas de Ensaio “Pedras naturais e artificiais. Análise de Argamassas”, Partes 01, 02, 06, 08, 11, 12, 19, 20, 21, 27, de Fernando M. A. Henriques, referem também alguns métodos de caracterização comparativa [70]. Estes e outros ensaios são ainda descritos por outros autores [14,22,28,37,40,61,71,72].

De qualquer forma, as técnicas aqui descritas são apenas sugeridas de entre um grande número de ensaios possíveis para caracterização de argamassas, e podem sofrer modificações ou adaptações, dependendo da necessidade e da importância do material que se está a analisar. Deve, no entanto, ser garantida a uniformização de procedimentos, caso contrário não se obtêm resultados comparáveis.

A determinação da densidade aparente de uma argamassa fresca ou em pó é bastante fácil de se obter utilizando um recipiente normalizado de volume e massa conhecidos - um picnómetro metálico. Este ensaio segue a norma europeia EN 1015-6 (“Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar”, 1996) [65].

No entanto, a determinação da densidade aparente de uma argamassa envelhecida pode ser bastante mais significativa para argamassas de reabilitação, já que é neste estado que vai ser recolhida a argamassa original. A comparação com uma argamassa nova deve ser feita depois de esta ter passado por um envelhecimento artificial. Como já foi mencionado anteriormente, em 5.1.1 – Técnicas de caracterização discriminatórias, a parte 10 da norma europeia EN 1015 (“Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”, 1999) [65] refere este ensaio. A determinação da densidade aparente é, assim, uma técnica comparativa, mas que pode também ser discriminatória no caso específico das argamassas leves. Com este ensaio é também possível determinar a porosidade aberta. Este método é também referido nas fichas de ensaio 01 e 02 (Determinação da massa volúmica e Determinação da porosidade, 1996) [70].

Quando se pretende estudar a porosidade de forma mais aprofundada, a porosimetria de intrusão de mercúrio é a técnica mais utilizada, se se assumir que neste tipo de argamassas a maioria dos poros são macroporos. Esta técnica regista automaticamente a pressão, o diâmetro do poro, o volume do poro e a área superficial específica [12,14,22].

A determinação da retracção linear pode ser determinada medindo variações de comprimento durante a secagem. Este pode ser um parâmetro importante para cálculos de dimensionamento para a aplicação da argamassa [37,71] mas, por razões óbvias, não tem qualquer interesse em argamassas envelhecidas. O ensaio está descrito na ficha de ensaio 20 (Variações dimensionais e ponderais, 1997) [70].

Outro tipo de informação que pode trazer grande vantagem à análise de argamassas é a das suas propriedades mecânicas. No entanto, existe alguma dificuldade em fazer ensaios mecânicos, principalmente na determinação da resistência à tracção, dado o tamanho muitas vezes diminuto das amostras de argamassas originais. A solução encontrada por

Moropoulou *et al* [12,22,56] é colocar fragmentos da argamassa a analisar numa matriz mais forte (uma resina epoxi ou uma argamassa muito mais forte) e proceder então a testes de aplicação de tensão, obtendo-se valores de resistência à tracção muito menores ($F_{mt,fracção}$) do que os que se obteriam se a argamassa estivesse intacta ($F_{mt,fracção} < 0,70 F_{mt,int}$).

No caso de a argamassa a analisar poder ser preparada num provete de maiores dimensões é possível obter mais informação sobre as características mecânicas do material a ensaiar, tal como resistência à compressão, à flexão ou módulo de elasticidade dinâmico. Neste caso os ensaios de flexão e compressão são executados com uma máquina de ensaios universal. A resistência à flexão é determinada num ensaio de três pontos num prisma de argamassa endurecida, até à fractura. A resistência à compressão é normalmente determinada nas duas partes resultantes do ensaio à flexão. Os procedimentos são descritos na norma europeia EN 1015 (“Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strenght of hardened mortar”, 1999) [65], na ficha de ensaio Fe 27 (Determinação das resistências à flexão e à compressão, 1999) [70] e são seguidos por vários autores [14,37,40,71,72].

Os módulos de elasticidade são determinados dinamicamente através da utilização de um equipamento específico para esse fim que identifica a frequência de ressonância do provete em teste e a converte para unidades convencionais [37,40,71], de acordo com a ficha de ensaio Fe 08 (Determinação do módulo de elasticidade dinâmico, 1996) [70].

As argamassas podem também ser avaliadas quanto ao coeficiente de capilaridade, ou seja, quanto à capacidade de absorção de água. Segundo a norma europeia EN 1015, parte 11 (“Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar”, 2002) [65] e a ficha de ensaio Fe 06 (Determinação da absorção de água por capilaridade, 1996) [70], uma amostra seca de dimensões normalizadas deve ser imersa em 5-10 mm de água durante um intervalo de tempo determinado, dentro de uma caixa fechada de modo a manter constantes as condições de humidade e para reduzir o volume de água evaporada dos provetes. Os valores de massa de água absorvida por unidade de área de face imersa são registados em função de \sqrt{t} . O coeficiente de absorção por capilaridade é depois dado pelo coeficiente angular da curva traçada a partir dos registos e

os valores assintóticos correspondem aos máximos de absorção (variações de massa menores que 1%). Este ensaio é referido por diversos autores [37,61,71].

Outra característica de uma argamassa que pode também ser analisada é a aderência [37]. A aderência, ou força de adesão, é determinada como a máxima tensão aplicada por uma força de tracção directamente proporcional à superfície onde está depositada a argamassa, até se dar a chamada rotura de aderência. Este ensaio é referido na norma europeia EN 1015, parte 12 (“Determination of adhesive strenght of hardened rendering and plastering mortars on substracts”, 2000) [65] e na ficha de ensaio Fe 21 [70].

A resistência a sais solúveis é normalmente analisada quanto à sua resistência a sulfatos e a cloretos [37,61,71]. O ensaio de determinação da resistência a sulfatos deve ser efectuado de acordo com o especificado na ficha de ensaio Fe 11 [70], através da colocação dos provetes numa solução de sulfato de sódio anidro. Com esses provetes procede-se alternadamente a ciclos de imersão durante 2 horas, e secagem em estufa durante aproximadamente 22 horas. Em cada um desses ciclos é determinada a perda de massa em relação à massa inicial do provete e avaliado o seu estado de integridade. O ensaio de determinação de resistência aos cloretos deve ser efectuado de acordo com a ficha de ensaio Fe 12 [70], imergindo os provetes numa solução saturada em cloreto de sódio durante 24 horas, e secando-os de novo na estufa. O procedimento a seguir é, de resto, idêntico ao anterior.

Por fim, pode ainda verificar-se a resistência a ciclos gelo-degelo. Este ensaio não é normalizado, mas pode ser um ponto de partida para avaliar a resistência de uma argamassa face a este tipo de fenómeno. Tal como em ensaios de resistência a sais solúveis, a argamassa deve ser sujeita a ciclos de grandes flutuações de temperatura, que permitam sucessivas mudanças entre os estados líquido e sólido da água contida na estrutura porosa [28]. No final de cada ciclo pode ser determinada a perda de massa relativamente ao provete inicial, que se deve à desagregação da argamassa pelo colapso dos poros com pressões internas elevadas. O estado de integridade deve ser também observado, e podem efectuar-se ensaios de resistência mecânica.

Na Tabela 2 está representado um resumo das técnicas que foram referidas anteriormente. Não estão, de qualquer forma, descuidadas outras técnicas de caracterização. No entanto, embora algumas destas técnicas sejam já utilizadas em alguns estudos de argamassas, é necessário ampliar o seu conhecimento e sistematizar os seus resultados especificamente para argamassas, permitindo maior rapidez de análise, o que pode ser indicado como um bom tema de estudo para o futuro.

Tabela 2 – Métodos de caracterização em argamassas

<i>Objectivo</i>	<i>Tipo de Análise</i>	<i>Técnica de Caracterização</i>
Determinação da distribuição granulométrica	-	Distribuição granulométrica - Crivagem
Determinação das propriedades físicas	-	<p>Massa volúmica aparente e porosidade – Saturação total em água e pesagem hidrostática</p> <p>Distribuição porosimétrica – porosimetria de intrusão de mercúrio</p> <p>Resistências à tracção, compressão, flexão; módulo de elasticidade; aderência – ensaios mecânicos</p> <p>Coefficiente de capilaridade, resistência a ciclos gelo-degelo, resistência a sais solúveis – observação da evolução em condições adversas</p>
Caracterização química e microestrutural	Análise química	<p>Por via húmida – Dissolução e determinação dos elementos (resíduo insolúvel, gravimetria, volumetria)</p> <p>Por via instrumental – Espectrofotometria de absorção atómica, espectrofotometria de emissão de plasma,...</p>
	Análise microestrutural	Microscopia óptica, microscopia electrónica de varrimento (SEM), microanálise química (EDX)
	Análise mineralógica	Difracção de raios X (DRX)
	Análise térmica	Termogravimetria (TG), Análise térmica diferencial (ATD)
	Análise orgânica	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

6 Criação da matriz

6.1 Identificação dos agregados

6.2 Identificação do ligante

6.2.1 Ligantes de gesso

6.2.2 Ligantes de cal aérea

6.2.3 Ligantes de cal hidráulica derivada da calcinação de calcário e argila

6.2.4 Ligantes de cal e pozolanas naturais

6.2.5 Ligantes de cal e pozolanas artificiais

6.2.6 Ligantes de cimento

6.3 Planeamento da argamassa para restauro

6 Criação da matriz

Nos capítulos anteriores já foram demonstrados os principais tipos de argamassas e divididas em grupos mais ou menos distintos quanto às suas propriedades físico-químicas e mecânicas. Foram também definidas técnicas úteis para a caracterização de argamassas. Resta finalmente definir um procedimento, que se pretende simples e de rápida execução, mas de grande fiabilidade, para que se possa atingir o objectivo proposto – a criação de uma matriz que relacione argamassas de restauro a argamassas originais.

6.1 Identificação dos agregados

Um primeiro passo para a identificação da argamassa original passa pela observação a olho nú e com microscópio óptico, numa tentativa de identificar o tipo e a forma dos agregados e de fazer uma descrição geral da amostra, e de forma a reconhecer eventuais resíduos de deterioração. A presença de agregados leves pode ser evidenciada pela sua elevada porosidade. Uma observação de maior ampliação, por microscopia electrónica (SEM), pode revelar pormenores como porosidade, distribuição granulométrica (qualitativa), impurezas, microorganismos, etc. Com microanálise EDX podem também tirar-se algumas conclusões quanto à composição química dos constituintes da argamassa.

Caso as observações microscópicas tenham evidenciado agregados de grande porosidade, tem de se pôr a hipótese da presença de agregados leves, e deve ser efectuada uma determinação da densidade aparente. A maioria dos agregados leves são compostos argilosos, exceptuando alguns agregados poliméricos que são facilmente identificáveis por ATD/TG pelas suas ligações orgânicas e agregados de vidro expandido que são identificados pela quase totalidade de quartzo na sua constituição, e por isso a sua análise de difracção de raios X e de ATD/TG pode evidenciar alguns silicatos e aluminatos, tal como acontece com agregados de fragmentos cerâmicos.

Seguidamente, deve proceder-se à separação entre o agregado e o ligante. Esta separação deve ser feita por intermédio de crivos normalizados, sendo que a fracção de partículas de

menor tamanho corresponde ao ligante (pode ainda conter alguma percentagem de agregado de menor dimensão) [21,66,67]. Nesta altura é já possível obter conclusões quanto à distribuição granulométrica dos agregados, quanto à forma e quanto à proporção deste material na mistura. Uma nova observação microscópica pode ser útil neste momento.

Se a amostra de argamassa original estiver disponível para ensaios em grande quantidade a separação entre o ligante e o agregado pode efectuar-se com um ataque químico numa fracção de argamassa de forma a que o resíduo insolúvel seja o agregado a analisar. Este ataque químico deve ser utilizado apenas se se garantir a existência de mais material para os restantes ensaios, já que a caracterização do ligante que se propõe de seguida necessita de material no seu estado original.

O estudo dos agregados, do ponto de vista químico, é relativamente simples, e pode ser conseguido por DRX e ATD/TG. Conforme a percentagem de quartzo, calcário, argila e silicatos e aluminatos hidratados, os agregados dividem-se essencialmente em agregados siliciosos, calcários, de cerâmicos ou tijolos fragmentados e agregados leves. A Fig. 13 mostra esquematicamente a metodologia que deve ser seguida para a identificação dos agregados.



Fig. 13 – Procedimento inicial para identificação dos agregados de uma argamassa

A distinção química dos tijolos fragmentados relativamente a outros agregados argilosos pode ser conseguida devido à presença de argilas e silicatos e aluminatos hidratados em quantidades significativas, acompanhados de uma baixa percentagem de calcite, e observações microscópicas dão também grande evidência de produtos de reacção sob a forma de veios na interface agregado – ligante [63]. No caso dos agregados de cerâmicos ou tijolos fragmentados e dos agregados leves, a sua identificação pode ser ainda mais completa (distinção entre os vários tipos, dentro da mesma categoria), exigindo estudos mais pormenorizados, como estudos de pozolanicidade, que não serão aqui referidos.

Até agora só é possível concluir que, caso existam fragmentos cerâmicos ou de tijolos, a argamassa pode apresentar um carácter moderadamente hidráulico. É necessário ter em atenção resultados que possam indicar a presença de agentes contaminantes e de mais de um tipo de agregados, e confirmá-la com as observações microscópicas feitas anteriormente.

6.2 Identificação do ligante

A metodologia para identificação do ligante é mais difícil de definir. O conjunto de minerais que o podem constituir é vasto, e passam por transformações que podem mascarar os resultados reais. O seu estudo deve sempre incluir o inter-relacionamento de várias técnicas de caracterização, e mesmo assim alguns resultados podem ser contraditórios. É necessário ter em conta a eventualidade da presença de uma percentagem mínima de agregado no material de análise, apesar de se aconselhar o estudo do ligante e do agregado em separado. A difracção de raios-X, a termogravimetria e a espectroscopia de infravermelhos são as técnicas mais acessíveis e de melhor compreensão de resultados.

Uma primeira distinção permite a separação em ligantes de gesso (caso o gesso detectado em todas as técnicas seja o constituinte maioritário. Se a sua contribuição for vestigial, ela pode ser atribuída a fenómenos de degradação ou à sua adição a cimentos), ligantes de cal aérea (matriz carbonatada e ausência de outro tipo de minerais) e ligantes hidráulicos (matriz carbonatada e outro tipo de minerais), que podem ser de cal hidráulica ou de cimentos.

A análise dos outros minerais presentes é um pouco mais complexa, já que a partir dela vão ser distinguidos tipos de argamassas que não apresentam variações abruptas de comportamento. Ou seja, só com a análise destes minerais é possível distinguir o nível de hidraulicidade da argamassa e “catalogá-la” para o seu grupo. Dentro dos ligantes hidráulicos podem considerar-se os seguintes grupos: cal hidráulica derivada da calcinação de calcário com argila, cal com aditivos pozolânicos naturais, cal com aditivos pozolânicos industriais ou artificiais, e cimentos.

6.2.1 Ligantes de gesso

Os ligantes de gesso são facilmente identificáveis por ATD/TG, DRX ou espectroscopia FTIR. No caso da ATD/TG os picos endotérmicos representativos deste material podem observar-se no intervalo 120-200 °C. Possivelmente também se pode distinguir um pequeno pico endotérmico por volta dos 120 °C que corresponde à água fisicamente adsorvida, ou água higroscópica. Em DRX ou FTIR o gesso apresenta picos bem definidos e facilmente identificáveis [63].

No entanto, o gesso está frequentemente associado à cal em diferentes proporções formando argamassas bastardas, e por isso os resultados têm de ser estudados tendo em conta este aspecto. Também a análise do cimento pode apresentar alguma percentagem de gesso, já que este lhe é adicionado como retardador de presa. Caso a quantidade de gesso seja muito diminuta relativamente ao outro ligante é ainda possível que se esteja na presença de gesso proveniente de produtos de degradação.

6.2.2 Ligantes de cal aérea

Para os ligantes de cal aérea, ou cal típica, os resultados de qualquer uma das técnicas são também bastante simples. A análise ATD/TG demonstra a ausência de picos importantes antes da decomposição da calcite que corresponde a uma perda de CO₂ superior a 30% da massa do ligante. Já a perda de água estrutural ligada a componentes hidráulicos, cujos picos correspondentes se situam entre os 200 e os 600 °C, é mínima e geralmente inferior a

3%. O rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ que expressa inversamente o carácter hidráulico de uma argamassa é portanto bastante elevado (superior a 10%), dependendo também o seu valor da eventual presença de agregados que podem influenciar os resultados pela contribuição que podem dar para a contabilização do CO_2 libertado e da água quimicamente adsorvida. Por volta dos 120 °C é reconhecida a perda de água adsorvida fisicamente, que também apresenta valores tipicamente muito baixos (~1%) [12,21,63].

Ainda na termogravimetria, e consoante as perdas de massa verificadas é possível, através de um procedimento químico analítico apropriado, prever uma proporção de um determinado constituinte na mistura real. Por exemplo, partindo da massa de CO_2 libertado é facilmente calculada a massa de calcite do ligante. A massa de ligante restante relaciona-se com os componentes hidráulicos, já que os adjuvantes, caso existam, não devem ultrapassar os 5% em massa de ligante.

Os resultados de difracção de raios X e de espectroscopia de infravermelhos mostram claramente a presença de calcite. É possível que seja detectada a presença de outros minerais, como dolomite e outros minerais com magnésio ou portlandite que não foi carbonatada. Consoante a percentagem destes constituintes é possível tirar conclusões quanto à pureza da rocha calcária que deu origem à cal e quanto a condições de carbonatação da argamassa no momento de aplicação.

A presença de portlandite, Ca(OH)_2 , pode induzir em erro a percepção dos resultados de ATD/TG, já que os seus picos de desidroxilação são visíveis dentro do intervalo normalmente associado a componentes hidráulicos. De qualquer forma as dúvidas são facilmente esclarecidas, já que a portlandite é identificada por difracção de raios X.

Ligantes com uma grande percentagem de portlandite não alterada apresentam geralmente uma perda de mais de 1% em massa de água fisicamente adsorvida, 4-12% de água quimicamente adsorvida e um conteúdo de CO_2 que oscila entre 18 e 34%. O rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ é então 1,5-9 [12,63].

Em muitos ligantes é detectável alguma percentagem de Ca(OH)_2 , que pode ser mais ou menos significativa. Como já foi referido por alguns autores [12,21,27], uma pequena quantidade de portlandite pode contribuir para um incremento na resistência mecânica da argamassa, mas se a quantidade de portlandite for muito elevada, a argamassa vai acabar

enfraquecida. Este factor tem de ser seriamente ponderado na preparação da argamassa de restauro, já que a carbonatação da argamassa não é facilmente controlável.

Outros minerais com presença apenas vestigial não são considerados para a elaboração de uma nova argamassa, como pode acontecer com alguns minerais argilosos cuja proveniência pode ser relacionada com a rocha calcária de origem ou com depósitos posteriores à aplicação da argamassa.

6.2.3 Ligantes de cal hidráulica derivada da calcinação de calcário e argila

Os ligantes que provêm da calcinação de rocha calcária com alguma percentagem de argila vão apresentar um fraco carácter hidráulico. Relativamente a outras argamassas hidráulicas de cal aditivadas de pozolanas naturais ou artificiais, a sua diferenciação não pode ser feita pela identificação de minerais argilosos e produtos de reacção hidráulica como os silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, já que argamassas de cal hidráulicas, independentemente do grau do seu carácter hidráulico, são caracterizadas, na sua maioria, pelo mesmo tipo de compostos. Assim, a diferenciação entre os vários tipos de argamassas hidráulicas com base de cal é feita pelo rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ que expressa inversamente o carácter hidráulico de um ligante ou de uma argamassa. Distinguem-se desta forma vários níveis hidráulicos: fraco, moderado e forte.

Quantitativamente, este tipo de argamassa apresenta aproximadamente 1% de água fisicamente adsorvida, com baixas percentagens de água ligada a componentes hidráulicos, tipicamente 3-7%, e um conteúdo de CO_2 libertado que varia entre 24 e 34% em massa de ligante. Isto reflecte-se num rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ entre 4 e 9, dependendo de grau de hidraulicidade do ligante [12,63].

Quanto à análise de DRX, os minerais identificáveis são os típicos de uma argamassa de cal hidráulica, como os silicatos e aluminatos de cálcio com algum grau de cristalinidade que são produtos de reacções hidráulicas (CAH, CSH), minerais argilosos, além da calcite, dolomite e outros minerais associados à cal [12,63].

6.2.4 Ligantes de cal e pozolanas naturais

No conjunto das argamassas de cal hidráulica as de cal aditivada de pozolanas naturais são as que apresentam um carácter hidráulico mais forte.

Aparentemente, os picos identificáveis em todas as técnicas de caracterização são idênticos aos do ligante de cal hidráulica derivada da calcinação de rocha calcária e argila, exceptuando a possível distinção por DRX, neste caso, de minerais zeolíticos como a analcite, a leucite e o diopsido [39]. Quantitativamente, a água fisicamente adsorvida ronda os 4-5% em massa de ligante, enquanto que a água estrutural expressa-se num significativo intervalo 5-14%. Por sua vez, a quantidade de CO₂ libertado varia entre 10 e 20% em massa, o que indica um rácio CO₂/H₂O_{est} inferior a 3, representativo de um ligante fortemente hidráulico [12,21,63].

6.2.5 Ligantes de cal e pozolanas artificiais

Estes ligantes caracterizam-se por possuírem um carácter hidráulico moderado/forte que varia com o tipo de pozolana adicionada e com a sua produção. Em termos de caracterização, pouco falta dizer sobre este tipo de ligante. Os resultados expectáveis de DRX, ATD/TG e FTIR são já conhecidos e a diferença está novamente na quantificação do rácio CO₂/H₂O_{est}. A água fisicamente adsorvida ronda tipicamente os 1-4%, a água estrutural ligada a componentes hidráulicos varia entre 3 e 9% e por fim o conteúdo de CO₂ libertado pertence normalmente ao intervalo 20-30%. O rácio CO₂/H₂O_{est} varia assim entre 3 e 6, o que confirma o carácter moderada/fortemente hidráulico deste ligante [12,21,63].

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados típicos da análise termogravimétrica para ligantes com base de cal, e os rácios CO₂/H₂O_{est}. Em conclusão, refere-se que este método é falível, e os resultados devem ser sempre ponderados tendo em conta os dados obtidos na análise dos agregados e nas observações microscópicas. Inúmeros factores podem influenciar os resultados: presença de impurezas, presença de agregados no que deveria ser apenas ligante, condições de processamento e de presa, etc.

Tabela 3 – Resultados de termogravimetria e rácios $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ típicos para ligantes à base de cal [12,21,63]

Tipo de ligante	H_2O fisicamente adsorvida (%)	H_2O ligada a componentes hidráulicos (%)	CO_2 (%)	$\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$
Cal típica	< 1	< 3	> 30	> 10
Cal e portlandite inalterada	> 1	4 - 12	18 - 34	1,5 - 9
Cal hidráulica de calcinação de calcário e argila	~1	3 - 7	24 - 34	4 - 9
Cal e pozolana artificial	1 - 4	3 - 9	20 - 30	3 - 6
Cal e pozolana natural	4 - 5	5 - 14	10 - 20	< 3

6.2.6 Ligantes de cimento

Os ligantes de cimento podem ser distinguidos dos outros ligantes hidráulicos por apresentarem compostos derivados da sinterização parcial que ocorre durante a produção do clínquer. Estes compostos, C_3S , C_3A , C_2S e C_4AF , só poderão ser detectados por DRX em outros ligantes caso tenha havido um erro na sua produção, ou seja, um sobreaquecimento a temperaturas da ordem da fusão parcial dos seus constituintes [14]. Durante a hidratação do cimento estes compostos vão formar essencialmente CSH e também CAH e CAS^*H , mas apenas num cimento ideal a hidratação seria completa. Por isso estes produtos de sinterização estão normalmente presentes na análise DRX.

Num cimento ideal seria também expectável não detectar qualquer vestígio de cal, pois em princípio toda a cal reage com os silicatos e aluminatos. No entanto, muitas vezes é detectada a presença da cal, assim como pode eventualmente ser detectada a presença do gesso e de minerais argilosos. Resumindo, os picos característicos dos cimentos em resultados de DRX são os da calcite e seus minerais associados, dos produtos de sinterização, dos produtos de hidratação, de minerais argilosos e do gesso [12,63].

Quanto à análise de resultados de ATD/TG, esta não vai ser diferente daquela que é feita para compostos hidráulicos com base de cal. A posição dos picos será essencialmente a mesma, e novamente a diferença está no cálculo do rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$. O carácter hidráulico

dos cimentos é bastante pronunciado, tal como nos ligantes de cal e pozolanas naturais, e os seus rácios vão ser idênticos ou ainda mais baixos [14,63].

A análise FTIR pode evidenciar a presença de alguns adjuvantes, já que sendo o cimento um produto moderno é o mais explorado na aplicação deste tipo de produtos.

De mais difícil análise são as argamassas bastardas, geralmente de cal e gesso, cimento e cal ou ainda cimento e pozolana. Para as de cal e gesso e de cal e cimento a identificação é um pouco mais acessível, pois os resultados mostram quantidades significativas de ambos os constituintes da mistura. Por exemplo, num ligante exclusivamente de cimento apenas deve ser detectada uma pequena quantidade de calcite que não reagiu com os silicatos e aluminatos da mistura, mas se essa quantidade for uma grande percentagem da massa total do ligante é possível que se esteja na presença de uma argamassa bastarda. Observações microscópicas e microanálise EDX podem facilitar algumas conclusões.

Para argamassas bastardas de cimento e pozolana a análise é mais complexa, principalmente se a pozolana for artificial, pois desta forma não são detectados em DRX os minerais zeolíticos associados à pozolana natural. A conclusão tem de ser tirada com base na quantidade de aluminatos e silicatos presentes, se estes estão em maior quantidade que os produtos de sinterização parcial, se não há presença de cal (os silicatos e aluminatos activos destas substâncias vão reagir com a cal livre deixada na presa do cimento, logo a calcite deixa de ser detectada), e novamente em observações microscópicas. Mesmo assim a análise não se pode considerar completamente fiável e, neste, caso aconselha-se uma caracterização comparativa de propriedades num conjunto de três argamassas: a argamassa antiga, uma exclusivamente de cimento e uma de cimento aditivada de pozolanas artificiais. Em conclusão, verifica-se mais uma vez a necessidade da caracterização de argamassas por intermédio de várias técnicas complementares. Na Fig. 14 é possível observar a metodologia proposta para a identificação dos vários tipos de ligantes.

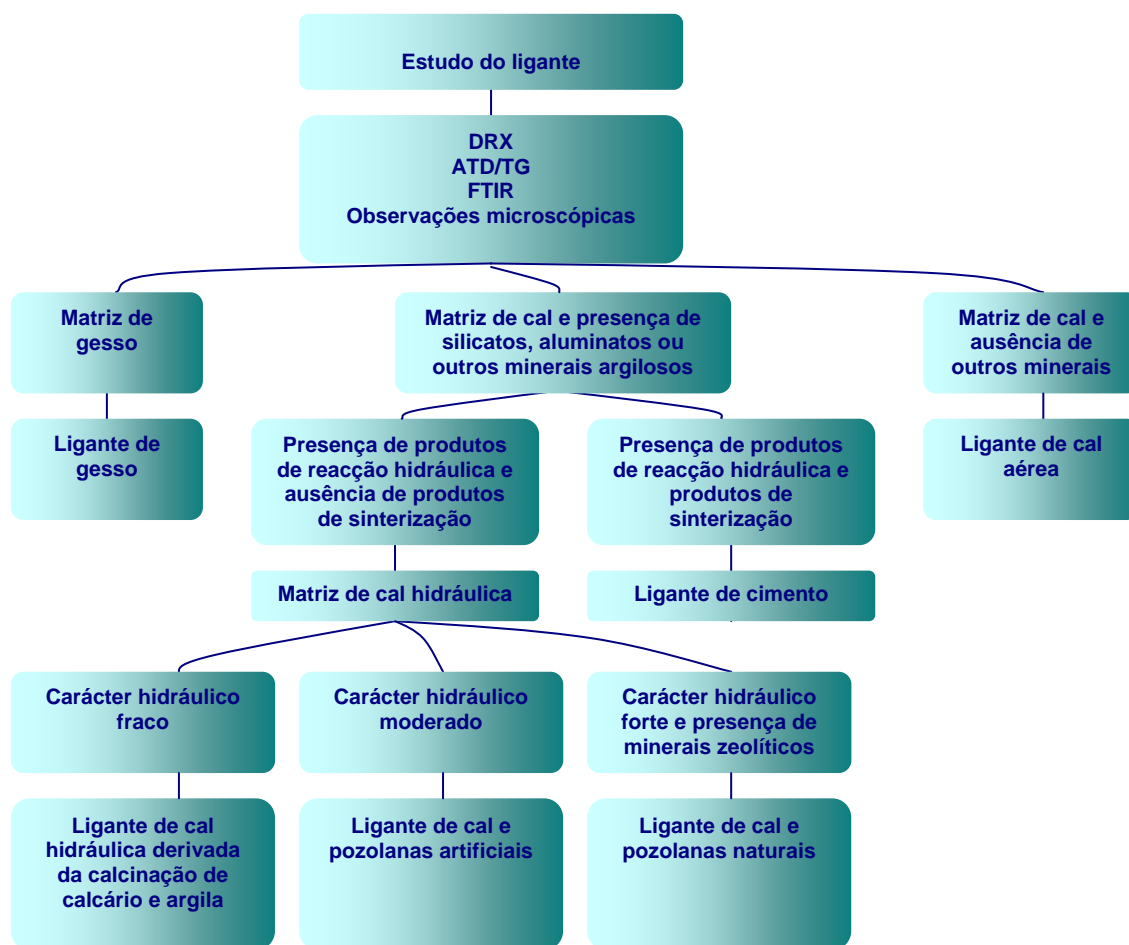


Fig. 14 – Metodologia proposta para a identificação do ligante

6.3 Planeamento da argamassa para restauro

Depois de identificados os materiais constituintes da argamassa antiga passa-se para a fase seguinte: o planeamento da argamassa para restauro. Conhecida a composição química de agregados e ligantes basta misturá-los na proporção evidenciada durante a análise granulométrica.

Nesta altura é necessário algum discernimento por parte do operador da argamassa, pois o objectivo é tentar recriar uma argamassa idêntica à original, mas se durante a caracterização se evidenciarem certas características que são prejudiciais ao bom funcionamento da argamassa estas têm de ser equacionadas. Veja-se o exemplo da cal dolomítica: a percentagem de dolomite vai certamente influenciar o comportamento da

argamassa, mas de uma forma negativa, já que este constituinte é muito mais propício à degradação por acção dos poluentes atmosféricos do que a cal pura, e a sua hidratação tardia pode levar à desagregação da argamassa. Ou seja, no caso da cal dolomítica a opção deve ser recriar todas as características da argamassa, mas substituindo a cal dolomítica por cal pura. Evitam-se desta forma fenómenos degradativos prejudiciais ao bom funcionamento da argamassa, e consequentemente, evitam-se intervenções de restauro frequentes, que se tornam dispendiosas e que podem ser nocivas para a estrutura como um todo [3,62].

A adição de adjuvantes deve também ser ponderada conforme o grau de evidência da sua existência demonstrado na argamassa original, o tipo de influência que pode ter e os factores degradativos que actuam na argamassa depois de colocada.

Depois de preparada, a argamassa de restauro vai passar por aquilo que alguns autores chamam de engenharia inversa [9,63,66,67], ou seja, devem ser efectuados ensaios comparativos de forma a verificar a compatibilidade entre as argamassas nova e antiga, e devem ser efectuadas as correcções necessárias à argamassa de restauro. O processo pode ser repetido as vezes que forem necessárias. Esta metodologia pode ser mais ou menos rigorosa, conforme a importância do edifício a restaurar. Antes de se proceder a uma operação de restauro torna-se necessário balancear todas as contrapartidas técnicas, financeiras e sócio-culturais de forma a encontrar o melhor compromisso para a importância do caso em análise. Caso não seja possível cumprir todas as etapas apontadas, pelo pouco valor da obra e pela demora que este processo de engenharia inversa pode ter, o que leva a contrapartidas desfavoráveis do ponto de vista comercial, pode reduzir-se este processo de selecção, embora seja sempre aconselhável efectuar ensaios comparativos e análise de provetes experimentais. Por fim, deve garantir-se que o processo de aplicação deve ser cuidado, e de preferência o mais aproximado possível da tecnologia original, seguindo certos aspectos [9]:

- Uma quantidade de água controlada, conduzindo a argamassa mais consistente, pode ser mais difícil de aplicar, mas resulta numa argamassa mais compacta, com maior resistência, menor tendência para fissurar e menor permeabilidade à água;

- o aperto da argamassa contra o suporte é muito importante já que contribui para garantir uma maior compacidade e menor fissuração;
- em rebocos multi-camada, um maior número de camadas, sucessivamente de menor espessura, diminui as tensões de retracção.

A aplicação deste tipo de cuidados em obra é cada vez mais rara, principalmente porque os tempos de aplicação demorados vão contra as exigências actuais dos construtores. Contudo, a qualidade final das argamassas é melhorada, o que se reflecte em melhores desempenhos e durabilidades, acabando por trazer grandes vantagens a médio/longo prazo, quer pelo aumento dos intervalos de tempo entre intervenções quer pela redução de custos que lhe é consequente.

Por último refere-se que todas as actividades de conservação e restauro de um edifício devem ser convenientemente registadas e documentadas a três níveis: o estado de conservação em que o edifício se encontrava antes da intervenção, todas as acções de conservação e restauro executadas, e por fim, a evolução dos resultados da intervenção. Este processo pode ser essencial para o sucesso de intervenções futuras, já que pode fornecer informações úteis quer do trabalho de conservação propriamente dito, quer da gestão da conservação e restauro do edifício.

7 Parte Experimental

7.1 Descrição dos ensaios

7.2 Caracterização das amostras

7.2.1 Amostras preparadas em laboratório

7.2.2 Argamassas antigas e de reabilitação

7.3 Processos de decisão para a criação da matriz

7.4 Teste à fiabilidade da matriz

7 Parte Experimental

No sentido de criar uma matriz de desenvolvimento de argamassas de reabilitação mais vocacionada para edifícios de pouco valor histórico foram caracterizadas diversas amostras de argamassas antigas, que se entenderam ser representativas das argamassas mais utilizadas em edifícios antigos, principalmente na região centro de Portugal. Escolheram-se algumas amostras de reboco estrutural, ou seja, camadas interiores de rebocos exteriores, de reboco de acabamento e de argamassas de alvenaria. As amostras foram retiradas de edifícios que estavam no momento a sofrer intervenções de restauro. Estas amostras foram designadas como Avanca 1, Avanca 2, Avanca 3, Avanca 4, Avanca 5, Avanca 6, Avanca acabamento, Azurva 2, Azenha, Elvas 1, Elvas 2 e Olhão.

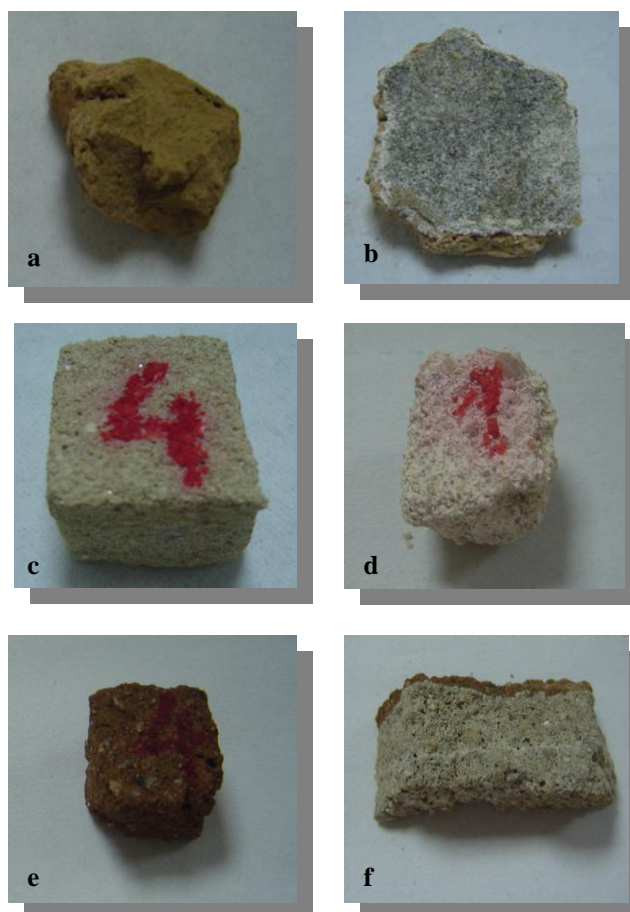


Fig. 15 – Amostras de argamassas antigas: Avanca 2 (a), Avanca acabamento (b), Azurva 2 (c), Olhão (d), Elvas 1 (e) e Elvas 2 (f).

Foram ainda caracterizadas duas argamassas de constituição química e propriedades mecânicas conhecidas pela Weber Cimenfix, que serão também analisadas pela matriz, de forma a testar a sua validade. Estas amostras foram designadas como R1 e R2, e foram testadas com 90 dias de cura. Durante este intervalo de tempo as amostras estiveram numa câmara climatizada com condições de temperatura e humidade relativa bem definidas: $T = 23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR = 50 \pm 5\%$. Os produtos R1 e R2 foram desenvolvidos com o objectivo de servirem propósitos de conservação de edifícios antigos, e são feitos à base de cal, à qual foram juntados alguns aditivos e adjuvantes para melhorar algumas propriedades. As suas características mecânicas e propriedades físicas, nomeadamente porosidade, resistência aos saís, absorção capilar, etc, foram estudadas para, em primeiro lugar, serem mais fracas que o suporte e de preferência que a argamassa antiga que vão substituir, para garantir que não comprometem a estrutura. Em segundo lugar, foram tidos em conta alguns dos principais problemas de degradação de edifícios antigos.

Ao mesmo tempo foram caracterizadas várias argamassas desenvolvidas em laboratório com a colaboração da Weber Cimenfix, variando vários parâmetros, como o tipo de ligante, tipo de agregado e proporção dos constituintes. Estas argamassas foram estudadas sob vários aspectos de modo a englobarem, de uma forma genérica, os tipos mais significativos de argamassas antigas existentes. Foram assim seleccionadas e produzidas 31 argamassas, variando o tipo de ligante entre cal, cal hidráulica (CH), cimento portland, gesso, pozolanas grosseiras e misturas entre estes, e o tipo de agregado entre areia de sílica, areia de “chorreio” (areia de sílica de maior granulometria) e agregado calcário “micromar”. Estes materiais e as suas proporções foram utilizados tendo em conta as técnicas de construção mais utilizadas para argamassas antigas, e de forma a garantir determinadas propriedades mecânicas e físicas. As amostras foram então colocadas numa câmara climatizada durante 90 dias, até à data de ensaio, com $T = 23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR = 50 \pm 5\%$, e algumas em câmara de carbonatação, onde se procedeu à pressurização de CO_2 até se garantir a carbonatação completa. Esta garantia pode ser obtida com o teste da fenolftaleína, que indica uma cor rosada quando existe portlandite.

As características destas argamassas serão introduzidas como base de dados na matriz, para que depois de uma caracterização bem cuidada das amostras antigas seja possível estabelecer uma correspondência entre a argamassa original e uma destas argamassas, que

servirá para o restauro da anterior. A correspondência envolve, numa primeira aproximação, aspectos químicos e de traço (proporção de constituintes). A partir daqui é possível ajustar outras propriedades físicas e mecânicas, com o objectivo de tornar as argamassas original e de restauro semelhantes, quer em termos de aspecto visual, quer em propriedades físico-químicas e mecânicas. Por exemplo, pode proceder-se a uma compensação da curva granulométrica de uma argamassa conforme a sua função na estrutura o que, conseqüentemente, vai modificar outras propriedades.

Os resultados da caracterização destas amostras serviram também para definir alguns factores de decisão da matriz, como os intervalos mais relevantes para os ensaios de ATD/TG, ou qual o tipo de informação a que se deve dar mais atenção num espectro de DRX. Ou seja, a análise da informação obtida permitiu uma maior sensibilização para os aspectos mais determinantes de cada ensaio e que devem ser mais focados durante a construção da matriz. Esta questão será melhor explicada na secção 7.3 - Processos de decisão para a matriz informatizada.

As amostras de argamassas antigas, R1 e R2 foram caracterizadas quanto à distribuição granulométrica, densidade geométrica, densidade aparente e porosidade aberta pelo método de saturação, com ataque químico com HCl para quantificação da percentagem de agregados de sílica, ensaios mecânicos englobando resistência à compressão, à flexão e módulo de elasticidade dinâmico, ensaios químicos para verificar a presença de sais resultantes de degradação e por difracção de raios X e análise térmica diferencial/termogravimetria. Para todas elas foram ainda efectuadas descrições visuais bem cuidadas (a olho nú).

As amostras de argamassas desenvolvidas em laboratório foram caracterizadas quanto à densidade geométrica, densidade aparente e porosidade aberta pelo método de saturação, propriedades mecânicas (resistência à compressão, à flexão e módulo de elasticidade dinâmico), por difracção de raios X e análise térmica diferencial/termogravimetria. Obviamente não se tornou necessária a análise aos sais resultantes de produtos de degradação por estas amostras não terem sido ainda colocadas em condições adversas.

7.1 Descrição dos ensaios

O primeiro ensaio a efectuar para a caracterização de uma argamassa é normalmente a determinação da sua distribuição granulométrica. Neste caso foi utilizado o jogo de peneiros nº 3 – ISO 3310, referido em NP EN 196 – Parte 6: “Métodos de ensaio dos cimentos. Determinação da finura”. Estes peneiros têm 200 mm de diâmetro nominal e 50 mm de profundidade com as seguintes aberturas de malha (mm): 0,080; 0,160; 0,315; 0,630; 1,250; 1,600; 2,000; 2,500. A fracção que passa no peneiro de malha mais pequena (<80 µm) é considerada ligante.

Um dos métodos muito utilizados para testar a densidade aparente das suas argamassas é por meios geométricos, ou seja, procuram-se medir as dimensões de um provete homogéneo, calculando-se o respectivo volume e medindo-se a massa. Para análise de argamassas antigas este método não se mostra muito fiável, já que é muito difícil conseguir um provete homogéneo, com dimensões bem definidas. Na maioria dos casos em que se tentam cortar as amostras para as tornar homogéneas elas desintegram-se pois não têm resistência mecânica suficiente. Apenas no caso das argamassas desenvolvidas em laboratório este método geométrico pode ser considerado fiável, já que as amostras são colocadas ainda em pasta num molde de dimensões bem definidas, adquirindo, quando secas, a forma imprimida por este.

Para a determinação da densidade aparente por meio de saturação a massa da amostra é medida em três condições: seca, totalmente imersa em água destilada (depois de 24 horas de saturação) e imediatamente depois de retirada da água. Aplicando as expressões:

$$\rho = \frac{m_{\text{seco}}}{m_{\text{hum}} - m_{\text{imp}}} \quad , \quad P = \frac{m_{\text{hum}} - m_{\text{seco}}}{m_{\text{hum}} - m_{\text{imp}}} \quad (5) , (6)$$

onde m_{seco} representa a massa da amostra seca, m_{hum} a massa da amostra depois de retirada da água destilada e m_{imp} a massa da amostra imersa, é possível obter a densidade aparente e a porosidade aberta. Ao utilizar esse método há que ter em conta um aspecto: se as amostras forem hidrofugadas a saturação da amostra poderá nunca ser completa, o que vai

propagar erros na determinação da densidade aparente. Este aspecto pode ser contornado se se monitorizar a massa da amostra a cada 15 minutos, e se não houver aumento de massa aparente entre duas medições pode considerar-se que a amostra está totalmente saturada [65].

O ataque químico é um meio bastante utilizado para quantificar agregados de natureza não calcária. Neste caso utilizou-se ácido clorídrico (HCl, 2M) mas pode também ser utilizado ácido nítrico [68]. Os agregados siliciosos são quantificados relacionando a massa de resíduo insolúvel e a massa total da argamassa.

Relativamente aos ensaios mecânicos, foram utilizadas máquinas universais de ensaios de flexão e compressão (Fig. 16). A resistência à flexão é determinada num ensaio de três pontos num prisma de argamassa endurecida, até à fractura. A resistência à compressão é determinada nas duas partes resultantes do ensaio à flexão.

Na maioria dos casos, nas argamassas antigas, não foi possível obter provetes com dimensões suficientes para estes ensaios, quer por falta de material, quer por dificuldades em obter provetes homogêneos por problemas de corte. Os provetes normalmente utilizados para estes ensaios têm dimensões bem definidas (4cmx4cmx16cm) (Fig. 17), mas é possível utilizar outras medidas. A metodologia para estes ensaios foi a seguinte:



Fig. 16 – Máquina universal de ensaios de flexão e compressão utilizada

- Resistência à flexão: aumentou-se a carga uniformemente à velocidade de 115 kPa/s. Anotou-se a carga máxima (F_f) suportada pelo provete até à sua ruptura. A resistência à flexão (R_f) em MPa é:

$$R_f = \frac{[1,5F_f \cdot L]}{G^2} \quad (7)$$

onde: F_f é a carga máxima suportada pelo provete (N), L a distância entre os cilindros de apoio (m) e G a espessura dos provetes (m).

- Resistência à compressão: quando possível, aproveitaram-se as metades dos provetes resultantes do ensaio anterior. Aumentou-se a carga uniformemente à velocidade de 245 kPa/s. Anotou-se a carga máxima (F_c) suportada pelo provete até à sua ruptura. A resistência à compressão (R_c) em MPa é:

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (8)$$

onde F_c é a carga máxima suportada pelo provete (N) e S é a área da superfície sobre a qual se aplica a tensão (m^2).

Para a determinação dos módulos de elasticidade foi utilizado um equipamento que indica a frequência de ressonância do provete em teste e a converte para unidades convencionais. Para este ensaio são necessários provetes normalizados de dimensões $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$, que podem ser observados na Fig. 17, e novamente não foi possível efectuá-lo na maioria das amostras antigas. A metodologia foi a seguinte:

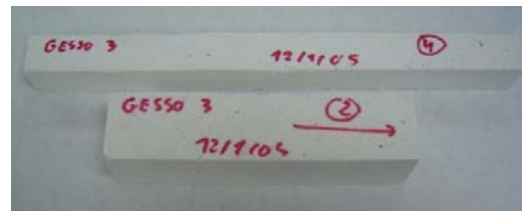


Fig. 17 – Provetes normalizados com dimensões $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$ e $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$

- Colocou-se o provete no banco de ensaio (Fig. 18), fixou-se ao suporte através das roscas laterais, garantindo que os pólos receptor e emissor se encontravam em contacto com os extremos do provete.
- No gerador de funções seleccionou-se o tipo de onda e a gama de frequências a utilizar.
- Através do gerador de funções executou-se um varrimento de frequências desde 1 até 10 kHz e procurou-se a frequência fundamental de ressonância (de maior amplitude).
- O módulo de elasticidade, ε , é dado pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{[4F^2 \cdot L \cdot P]}{g \cdot V} \quad (9)$$

onde L é o comprimento do provete (mm), F a frequência de ressonância (Hz), P a massa do provete (g), g a aceleração gravítica (cm/s^2) e V o volume do provete (cm^3). O módulo de elasticidade expressa-se em MPa.



Fig. 18 – Equipamento utilizado para a determinação do módulo de elasticidade

As argamassas antigas foram também analisadas quanto à presença de sais na sua estrutura, saís estes que são produtos de degradação. Os produtos normalmente analisados são os cloretos, sulfatos, nitritos e nitratos. Não existe um procedimento normalizado para este tipo de ensaio, e o adoptado aqui utiliza o ataque com ácidos conhecidos de forma a verificar se existe formação de precipitados na amostra. Em primeiro lugar, começa-se por misturar as amostras moídas em água destilada, e deixam-se sedimentar as partículas. De

seguida filtra-se a mistura com um mecanismo de filtração por vácuo para analisar a água destilada, que contém os possíveis sais dissolvidos. Os ensaios químicos efectuados para verificar a presença de cada tipo de sal foram os seguintes:

Cloretos (Cl^-)

Para analisar a presença de cloretos adicionam-se umas gotas de ácido nítrico, HNO_3 (2 M). Juntam-se também umas gotas de nitrato de prata, $AgNO_3$ (0,1 M), e se se verificar a formação de precipitados pode concluir-se que existem cloretos na solução, como se observa na Fig. 19.



Fig. 19 – Formação de precipitados que indicam a presença de cloretos na amostra Azurva 2

Sulfatos (SO_4^{2-})

Em primeiro lugar é necessário acidificar a solução de sais e água destilada com HCl (2 M), para que em seguida o cloreto de bário possa reagir com os sulfatos eventualmente presentes. Adicionam-se então umas gotas de cloreto de bário, $BaCl$ (10%). Se houver precipitação é, em princípio, devido à presença de sulfatos. No entanto, é ainda necessário adicionar algumas gotas de ácido nítrico, HNO_3 (2 M). Se o precipitado persistir, poderá ter-se certeza da presença de sulfatos na solução.

Nitritos (NO_2^-)

A presença de nitritos verifica-se com a presença de um precipitado cor-de-rosa depois de adicionado ácido acético CH_3COOH (2 M) e o reagente Griess-Ilosvay's (A e B).

Nitratos (NO_3^-)

Para verificar a presença de nitratos, e caso não haja nitritos, adiciona-se uma pequena quantidade de zinco em pó à mistura anterior. O zinco vai reduzir os nitratos a nitritos, e vai observar-se o precipitado cor-de-rosa.

Por fim, todas as amostras foram caracterizadas por difracção de raios X e por análise térmica diferencial/termogravimetria. A difracção de raios X das amostras em pó foi realizada num difractómetro Rigaku, utilizando radiação Cu $k\alpha$, entre 4 e 80°, com um varrimento de 3°/min. A análise dos difractogramas foi realizada recorrendo a uma base de dados ICDD. A análise térmica diferencial/termogravimetria foi efectuada num equipamento de recolha de dados simultânea de análise térmica diferencial e análise termogravimétrica, Setaram Labsys TG-DTA/DSC, utilizando um padrão de alumina, ao ar, com um aquecimento desde a temperatura ambiente até 1000 °C e um incremento de 5°C/min.

7.2 Caracterização das amostras

7.2.1 Amostras preparadas em laboratório

O primeiro grupo de amostras caracterizadas corresponde às argamassas preparadas em laboratório com o objectivo de constituírem a base de dados da matriz. Algumas das propriedades estudadas para estas argamassas estão representadas na tabela seguinte.

Tabela 4 – Propriedades estudadas para as argamassas desenvolvidas em laboratório, que serão introduzidas como base de dados na matriz.

	Constituição	Traço	Constituição com H ₂ O de amassadura	ρ_{geom} (g/cm ³)	P (%)	ρ_{satur} (g/cm ³)
Cal 1	75% Areia 25% Cal	1:3	59,5% Areia 19,9% Cal 20,6% H ₂ O	1,48	27,0	1,57
Cal 2	67% Areia 33% Cal	1:2	50,8% Areia 25,0% Cal 24,2% H ₂ O	1,38	34,8	1,60
Cal 3	50% Areia 50% Cal	1:1	34,2% Areia 34,2% Cal 31,6% H ₂ O	1,19	50,2	1,57
B Cal 1	60% Areia 20% Cal 20% Cimento	1:1:3	48% Areia 16% Cal 16% Cimento 20% H ₂ O	1,64	23,5	1,63
B Cal 2	70% Areia 20% Cal 10% Cimento	2:1:7	56% Areia 16% Cal 8% Cimento 20% H ₂ O	1,59	25,8	1,54
B Cal 3	75% Areia 20% Cal 5% Cimento	2:0,5:7,5	60% Areia 16% Cal 4% Cimento 25% H ₂ O	1,58	22,8	1,60
B Cal 4	70% Areia 10% Cal 20% Cimento	1:2:7	58,8% Areia 8,4% Cal 16,8% Cimento 16,0% H ₂ O	1,81	17,7	1,64
CH 1	60% Areia 20% Cal 20% CH	1:1:3	47,0% Areia 15,7% Cal 15,7% CH 21,6% H ₂ O	1,49	29,2	1,60
CH 2	70% Areia 20% Cal 10% CH	2:1:7	56% Areia 16% Cal 8% CH 20% H ₂ O	1,53	25,3	1,61

Tabela 4 (Cont.) – Propriedades estudadas para as argamassas desenvolvidas em laboratório, que serão introduzidas como base de dados na matriz.

	Constituição	Traço	Constituição com H ₂ O de amassadura	ρ_{geom} (g/cm ³)	P (%)	ρ_{sat} (g/cm ³)
CH 3	70% Areia 10% Cal 20% CH	1:2:7	57,5% Areia 8,1% Cal 16,5% CH 17,9% H ₂ O	1,63	23,2	1,58
CH 4	75% Areia 25% CH	1:3	62,8% Areia 20,9% CH 16,3% H ₂ O	1,62	21,4	1,58
POZ 1	60 % Areia 20% Cal 20% Pó de tijolo	1:1:3	48,6% Areia 16,2% Cal 16,2% Pó de tijolo 23,5% H ₂ O	1,50	25,7	1,53
POZ 2	70 % Areia 20% Cal 10% Pó de tijolo	2:1:7	57,7% Areia 16,6% Cal 8,3% Pó de tijolo 17,4% H ₂ O	1,57	23,5	1,56
POZ 3	70 % Areia 10% Cal 20% Pó de tijolo	1:2:7	59,3% Areia 8,5% Cal 16,9% Pó de tijolo 15,3% H ₂ O	1,61	20,6	1,62
Micro Cal	75% Micromar 25% Cal	1:3	59,8% Micromar 19,9% Cal 20,3% H ₂ O	1,52	27,4	1,56
Cho Cal	75% Chorreo 25% Cal	1:3	59,3% Chorreo 19,7% Cal 21,0% H ₂ O	1,47	29,4	1,56
Cim	75% Areia 25% Cimento	1:3	63% Areia 21% Cimento 16% H ₂ O	1,74	15,2	1,70
Micro Cim	75% Micromar 25% Cimento	1:3	63,6% Micromar 21,2% Cimento 15,2% H ₂ O	1,84	16,0	1,60
Cho Cim	75% Chorreo 25% Cimento	1:3	65,2% Chorreo 21,7% Cimento 13,1% H ₂ O	1,87	12,5	1,66
Micro CH	75% Micromar 25% CH	1:3	62,0% Micromar 20,7% CH 17,3% H ₂ O	1,66	24,6	1,54
Cho CH	75% Chorreo 25% CH	1:3	64,4% Chorreo 21,4% CH 14,2% H ₂ O	1,75	20,3	1,58
Gesso 1	80% Areia 20% Gesso	1:4	69,9% Areia 17,4% Gesso 13,0% H ₂ O	1,61	11,1	1,98

Tabela 4 (Cont.) – Propriedades estudadas para as argamassas desenvolvidas em laboratório, que serão introduzidas como base de dados na matriz.

	Constituição	Traço	Constituição com H ₂ O de amassadura	ρ_{geom} (g/cm ³)	P (%)	ρ_{satur} (g/cm ³)
Gesso 2	75% Areia 25% Gesso	1:3	65,2% Areia 21,7% Gesso 13,1% H ₂ O	1,53	15,1	2,23
Gesso 3	67% Areia 33% Gesso	1:2	57,3% Areia 28,2% Gesso 14,5% H ₂ O	1,56	14,9	1,92
Gesso 4	50% Areia 50% Gesso	1:1	41,3% Areia 41,3% Gesso 17,4% H ₂ O	1,50	20,2	1,76
Gesso Cal	60% Areia 20% Gesso 20% Cal	1:1:3	46,9% Areia 15,6% Gesso 15,6% Cal 17,4% H ₂ O	1,39	29,2	1,72
Gesso CH	60% Areia 20% Gesso 20% CH	1:1:3	49,6% Areia 16,5% Gesso 16,5% CH 17,4% H ₂ O	1,62	16,5	1,80
Gesso Cim	60% Areia 20% Gesso 20% Cimento	1:1:3	50,8% Areia 16,9% Gesso 16,9% Cimento 15,4% H ₂ O	1,70	21,9	1,66
Cal pura	100% Cal	-	54,6% Cal 45,4% H ₂ O	0,94	-	-
CH pura	100% CH	-	71,2% CH 28,8% H ₂ O	1,49	40,1	1,56
Cim puro	100% Cim	-	78,1% Cim 21,9% H ₂ O	2,08	10,0	1,74

Estas argamassas foram testadas após cura de 90 dias em câmara climatizada ou, no caso das amostras de ligantes puros, até carbonatação completa em câmara de carbonatação. As proporções são dadas na tabela com a amostra em seco e depois de adicionada a água de amassadura. A água de amassadura é adicionada até se obter uma trabalhabilidade considerada adequada.

De uma forma geral verifica-se que a porosidade é menor para argamassas de gesso e de cimento e maior para argamassas de cal, e que esta diminui com o aumento da proporção de agregados (Fig. 20). A baixa porosidade das argamassas de gesso pode dever-se ao seu ligeiro efeito expansivo, que vai ocupar em parte a estrutura porosa. Da mesma forma,

verifica-se um aumento da percentagem de água de amassadura para argamassas de cal para garantir uma trabalhabilidade semelhante às de cimento e cal hidráulica. Esta água evapora durante a secagem, e é a grande responsável pela elevada porosidade, particularmente em argamassas de cal. Este aspecto verifica-se principalmente na argamassa de Cal pura, sem agregados. De qualquer forma, não foi possível quantificar a porosidade ou a densidade por método de saturação para esta argamassa pois as amostras desintegravam-se em contacto com a água.

Para a amostra CH pura observa-se uma maior porosidade e menor densidade relativamente às argamassas de cal hidráulica com agregados, ao contrário de Cim puro, que apresenta uma porosidade mais reduzida (~10%) sem agregados. Nas determinações da densidade observa-se uma discrepância de valores entre os dois métodos, e por isso considera-se a determinação da densidade por saturação como a mais fiável, sendo este um método normalizado.

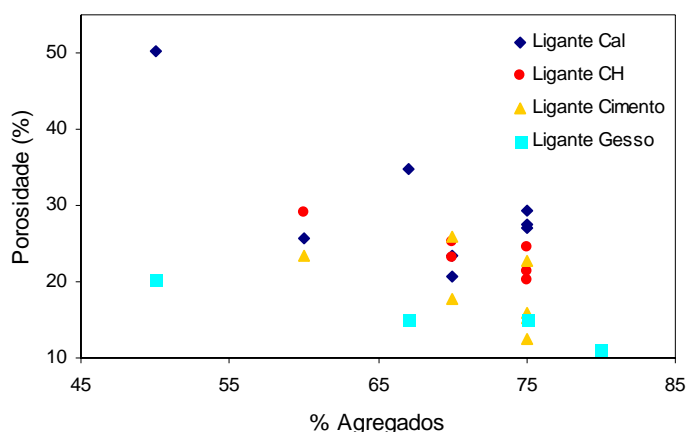


Fig. 20 – Variação da porosidade das argamassas com a percentagem de agregados e tipo de ligante. As amostras de cal com pozolanas estão incluídas nas de ligante de cal.

Relativamente às resistências mecânicas (Tabela 5), verifica-se que existe uma proporcionalidade entre a resistência à compressão, à flexão e o módulo de elasticidade, e que estes têm a seguinte ordem crescente de valores: gesso, cal, cal hidráulica e cimento (Fig. 21). Observa-se que as resistências das amostras de cal hidráulica se aproximam mais das de cal do que das de cimento, o que leva a pensar que a cal hidráulica utilizada tem um carácter hidráulico relativamente baixo. As amostras contendo pozolanas têm valores de resistências mecânicas idênticos aos da cal, o que também leva a crer que estas pozolanas

são pouco efectivas, ou seja, conferem um baixo carácter hidráulico quando adicionadas a argamassas de cal. As argamassas bastardas têm valores de resistências intermédios entre os valores das argamassas dos seus constituintes individuais.

É ainda possível verificar que as amostras bastardas de cal e cal hidráulica ou cimento em que a sua proporção é baixa relativamente à percentagem de cal têm valores de resistência idênticos aos da cal, ou seja, conclui-se que a sua adição a argamassas de cal não é suficiente para lhes conferir um carácter hidráulico que justifique a mistura.

Para as amostras de gesso (Gesso 1, Gesso 2, Gesso 3 e Gesso 4) e de Cal pura não foi possível efectuar ensaios de determinação do módulo de elasticidade devido à impossibilidade de se produzirem amostras com as dimensões requeridas, 25x25x285 mm³. Durante a desmoldação das amostras estas desfaziam-se devido às suas baixas resistências mecânicas, como se pode verificar pelos valores obtidos para as resistências à compressão e à flexão.

Tabela 5 – Resultados dos ensaios mecânicos às amostras desenvolvidas em laboratório.

Amostra	R _c (MPa)	R _f (MPa)	ε (MPa)	Amostra	R _c (MPa)	R _f (MPa)	ε (MPa)
Cal 1	1,56	0,53	4435,25	Cim	19,04	3,21	17190,43
Cal 2	1,53	0,59	4714,46	Micro Cim	15,94	4,53	16730,66
Cal 3	1,23	0,46	2856,08	Cho Cim	18,91	4,03	21575,85
B Cal 1	8,77	1,81	12593,76	Micro CH	1,85	0,58	7871,86
B Cal 2	2,79	0,86	8802,58	Cho CH	2,23	0,56	10503,00
B Cal 3	1,46	0,60	4870,00	Gesso 1	0,24	0,13	-
B Cal 4	11,31	2,95	18408,00	Gesso 2	0,48	0,15	-
CH 1	2,19	0,57	6196,27	Gesso 3	0,52	0,21	-
CH 2	1,52	0,42	4689,84	Gesso 4	0,52	0,25	-
CH 3	2,65	0,74	5781,39	Gesso Cal	1,39	0,38	5920,39
CH 4	2,79	0,87	6088,58	Gesso CH	2,45	0,80	8012,00
POZ 1	1,38	0,53	5085,56	Gesso Cim	5,98	2,09	12642,72
POZ 2	1,36	0,54	5620,63	Cal pura	0,74	0,29	-
POZ 3	1,23	0,51	4321,12	CH pura	7,69	2,29	8166,03
Micro Cal	1,63	0,59	7202,43	Cim puro	26,64	5,86	30295,40
Cho Cal	0,59	0,40	5132,90				

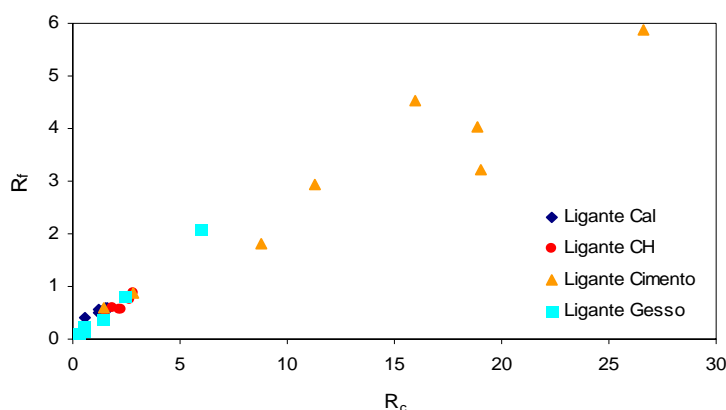


Fig. 21 – Proporcionalidade entre as resistências à compressão e à flexão. Verifica-se um aumento das resistências mecânicas para as argamassas hidráulicas, principalmente para as de cimento.

Para as amostras de ligantes puros, excluindo a cal, verificam-se resistências à compressão e à flexão superiores às amostras correspondentes com agregados. A presença de agregados deveria favorecer estas propriedades, no entanto as elevadas resistências obtidas pelas amostras de ligantes puros podem ser explicadas pela maior homogeneidade das amostras e pela ausência de interfaces entre agregados e ligantes que são geralmente os pontos mais fracos de toda a estrutura. A Cal pura apresenta propriedades mecânicas baixas pela elevada porosidade, que por sua vez está relacionada com uma percentagem de água de amassadura de cerca de 80%.

Quanto à mudança de agregados, as amostras contendo quartzo têm, de um modo geral, resistências ligeiramente mais elevadas que as amostras correspondentes contendo agregados calcários. A grande exceção é a amostra Cho Cal, que possivelmente devido a tensões internas apresenta uma resistência à compressão muito inferior às restantes amostras de cal.

Nas análises por DRX e ATD/TG os resultados, tal como previsto, permitem agrupar as argamassas, divididas por diferentes tipos de ligantes. Por DRX é possível distinguir argamassas de gesso, de cal típica, e argamassas hidráulicas (cal hidráulica, cimento ou bastardas). É também facilmente identificável o quartzo, o que permite obter uma informação qualitativa com elevado grau de certeza quanto à natureza dos agregados. Na Tabela 6 é possível observar os resultados obtidos com a difracção de raios X para estas amostras.

Tabela 6 – Análise mineralógica obtida por DRX das amostras desenvolvidas em laboratório. Calcite: CaCO_3 ; Portlandite: Ca(OH)_2 ; Quartzo: SiO_2 ; Dolomite: $\text{CaMg(CO}_3)_2$; Silicato dicálcico: Ca_2SiO_4 ; Silicato tricálcico: Ca_3SiO_5 ; Etringite: $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$; Sulfato de magnésio hidratado: $\text{MgSO}_4(\text{Mg(OH)}_2)_{0,33}(\text{H}_2\text{O})_{0,33}$; Microclina: KAlSi_3O_8 ; Gesso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; Hatrurite: Ca_3SiO_5 .

Amostra	Constituição
Cal 1	Calcite, portlandite, quartzo
Cal 2	Calcite, portlandite, quartzo
Cal 3	Calcite, portlandite, quartzo
B Cal 1	Calcite, portlandite, quartzo, silicato tricálcico
B Cal 2	Calcite, portlandite, quartzo
B Cal 3	Calcite, portlandite, quartzo
B Cal 4	Calcite, portlandite, quartzo, silicato tricálcico, etringite
CH 1	Calcite, portlandite, quartzo, etringite
CH 2	Calcite, portlandite, quartzo, etringite
CH 3	Calcite, portlandite, quartzo, etringite
CH 4	Calcite, quartzo, silicato tricálcico, etringite
POZ 1	Calcite, portlandite, quartzo
POZ 2	Calcite, portlandite, quartzo
POZ 3	Calcite, portlandite, quartzo
Micro Cal	Calcite, portlandite, dolomite, quartzo
Cho Cal	Calcite, portlandite, quartzo, sulfato de magnésio hidratado
Cim	Calcite, portlandite, quartzo, silicato dicálcico, silicato tricálcico
Micro Cim	Calcite, portlandite, quartzo, silicato tricálcico
Cho Cim	Calcite, portlandite, quartzo, silicato tricálcico, etringite
Micro CH	Calcite, portlandite, quartzo
Cho CH	Calcite, quartzo, microclina, etringite
Gesso 1	Gesso, quartzo
Gesso 2	Gesso, quartzo
Gesso 3	Gesso, quartzo
Gesso 4	Gesso, quartzo
Gesso Cal	Gesso, calcite, portlandite, quartzo
Gesso CH	Gesso, calcite, portlandite, etringite, quartzo
Gesso Cim	Gesso, calcite, portlandite, etringite, silicato tricálcico, quartzo
Cal pura	Calcite, quartzo
CH pura	Calcite, quartzo, etringite, silicato tricálcico, microclina
Cim puro	Calcite, quartzo, etringite, silicato tricálcico, silicato dicálcico, gesso, microclina, hatrurite

As argamassas de gesso são facilmente distinguidas das argamassas restantes pelos seus picos bem definidos de gesso e de quartzo (Fig. 22(a)). Em argamassas de cal típica são visíveis apenas os picos do quartzo, da calcite e eventualmente da portlandite, caso a cal não tenha recarbonatado completamente (Fig. 22(b)), o que se verificou, aliás, em quase todas as amostras analisadas aos 90 dias que não passaram pela câmara de carbonatação. Este aspecto prova, como já foi referido anteriormente, que a cal pode demorar mesmo vários anos a carbonatar, dependendo da constituição da argamassa e das suas características de porosidade. Nos casos em que os agregados não eram de quartzo o pico da calcite mostrou-se bastante mais evidenciado, permitindo concluir a existência de uma grande quantidade de calcite, proveniente da cal e de agregados (Fig. 22(c)). No entanto, o quartzo era sempre observável, embora em quantidades vestigiais.

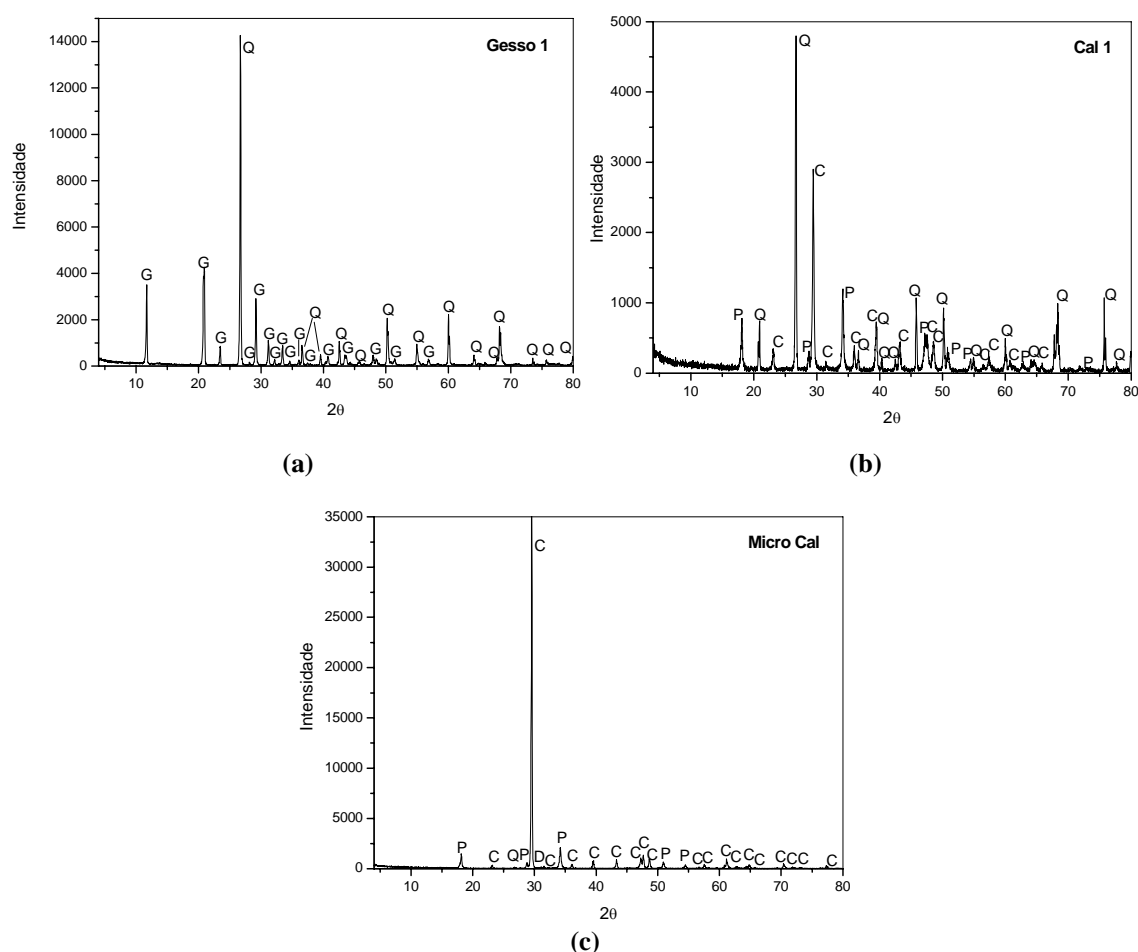


Fig. 22 – Difractogramas das amostras Gesso1 (a), Cal 1 (b) e Micro Cal (c). Estas amostras são bem distinguíveis pelos seus picos característicos: gesso (G), calcite (C), quartzo (Q), portlandite (P) e dolomite (D).

Observam-se algumas contaminações de magnésio, já que este elemento é identificado em algumas argamassas de cal (Micro Cal e Cho Cal).

As amostras de ligantes puros mostram essencialmente os mesmos picos que as amostras correspondentes com agregados, exceptuando, obviamente, os picos de quartzo (apesar de este continuar a ser identificado em quantidades vestigiais) e de portlandite.

As argamassas de cal hidráulica, cimentos e de misturas entre estes ligantes e cal são facilmente distinguíveis das argamassas de cal e de gesso, mas não são bem diferenciáveis entre si, como se pode comprovar pela Fig. 23. São claramente visíveis os picos do quartzo (quando era este o agregado), da calcite, e por vezes da portlandite, gesso (adicionado ao cimento) e de alguns feldspatos.

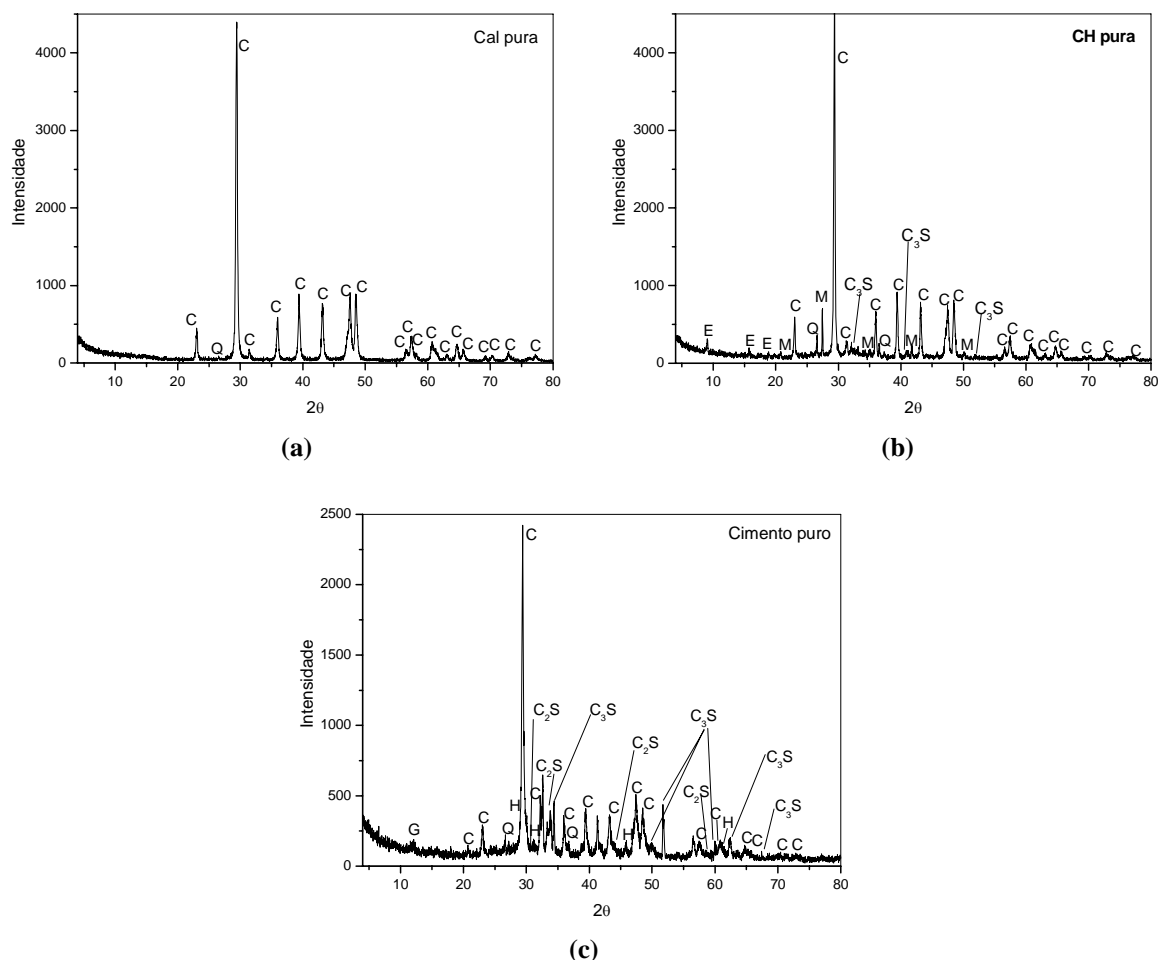


Fig. 23 – Difractogramas das argamassas de Cal pura (a), CH pura (b) e Cim puro (c). A cal pura distingue-se pelos picos unicamente de calcite e quartzo vestigial (a). Em (b) e (c) observam-se picos de silicatos de cálcio e etringite. Não se observam picos que possam distinguir a cal hidráulica do cimento por difracção de raios X. Calcite: C; Quartzo: Q; Etringite: E; Microclina: M; Silicato tricálcico: C₃S; Silicato dicálcico: C₂S; Gesso : G; Hatrurite: H.

Podem também observar-se picos correspondentes a etringite, a silicatos dicálcico e tricálcico e hatrurite, que é também uma forma de silicato tricálcico. Estes picos, no entanto, são normalmente próprios de ligantes de cimento, já que correspondem a produtos que resultam da formação do clínquer. Estas ocorrências levam à conclusão que as temperaturas de processamento da cal hidráulica devem ter sido bastante elevadas, ao ponto de se ter iniciado uma fusão parcial que leva à formação de C_3S e C_2S , e que a cal hidráulica foi adicionada de uma alguma quantidade de gesso. Este procedimento é efectuado por vários produtores destes materiais com o objectivo de que o gesso funcione como um retardador de presa, como num cimento. Verifica-se, pelo facto de se observarem picos de produtos de clínquer, que não houve hidratação totalmente eficaz da argamassa. O facto de se detectarem poucos picos hidráulicos, e de baixa intensidade, tem a ver com a baixa cristalinidade de muitos dos compostos que se formam nas reacções hidráulicas.

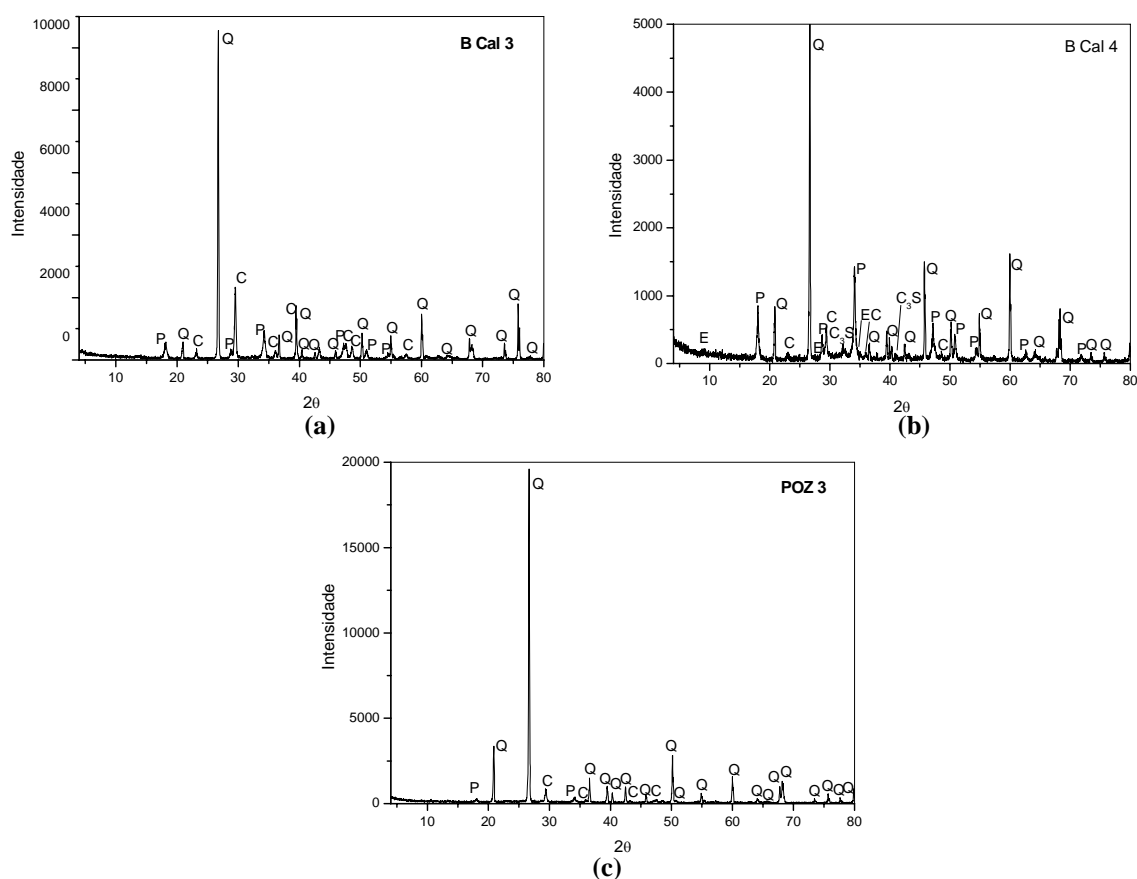
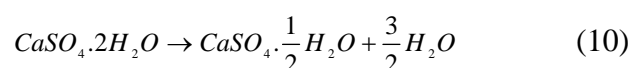


Fig. 24 – Difractogramas das amostras B Cal 3 (a), B Cal 4 (b) e POZ 3 (c). Se a adição de cimento à cal ocorrer numa proporção bastante menor relativamente a este último, o cimento não é identificado por DRX (a). Apenas são visíveis os picos de ligantes hidráulicos quando estes são adicionados à cal, no mínimo, na mesma na mesma proporção (b). Nas argamassas com pozolanas não são observados picos hidráulicos (c). Calcite: C; Portlandite: P; Quartzo: Q; Etringite: E; Silicato tricálcico: C_3S .

De uma forma geral, verifica-se que em argamassas bastardas em que o ligante hidráulico existia em muito menor percentagem relativamente à cal não são visíveis picos relativos a componentes hidráulicos (Fig. 24(a)). Conclui-se também a pouca efectividade da adição das pozolanas utilizadas relativamente ao aumento do carácter hidráulico das argamassas de cal, ou seja, as pozolanas escolhidas podem considerar-se com carácter hidráulico fraco, mesmo quando adicionadas em maior quantidade que a cal (Fig. 24(c)), como já havia sido concluído com os resultados das propriedades mecânicas. No caso da amostra Micro CH não são identificados picos de ligantes hidráulicos, talvez porque possam estar encobertos pelo pico de grande intensidade da calcite dos agregados. Este aspecto mostra a vantagem de, futuramente, se realizarem análises apenas na fracção de ligante.

Ao analisar os resultados de ATD/TG verifica-se também a fácil distinção entre argamassas de gesso, cal, e de ligantes hidráulicos. Para argamassas de gesso verifica-se apenas uma perda de massa significativa até 200 °C. Observa-se também um pico endotérmico sem perda de massa correspondente a quartzo (~580 °C), que desta forma não pode ser quantificado. O gesso, por seu lado, pode ser contabilizado (percentagem de gesso na mistura inicial, em pasta) tendo em conta que a cada molécula de CaSO_4 estão ligadas duas moléculas de água, e que a temperaturas por volta dos 120 – 150 °C a água é parcialmente evaporada, ficando apenas um hemi-hidrato, segundo a expressão:



ou seja, para cada molécula de sulfato de cálcio hidratado perdem-se 1,5 moléculas de água a esta temperatura. Sabendo que as massas molares de CaSO_4 e de H_2O são 172,1680 e 18,0152 g.mol⁻¹, respectivamente, é possível calcular a percentagem de gesso inicial na mistura, através das seguintes equações:

$$m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = \frac{M_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}}}{1,5 \times M_{\text{H}_2\text{O}}} \times m_{\text{H}_2\text{O}} \quad (11)$$

$$m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = \frac{172,1680}{1,5 \times 18,0152} \times m_{\text{H}_2\text{O}} \quad (12)$$

$$m_{\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}} = 6,37 m_{\text{H}_2\text{O}} \quad (13)$$

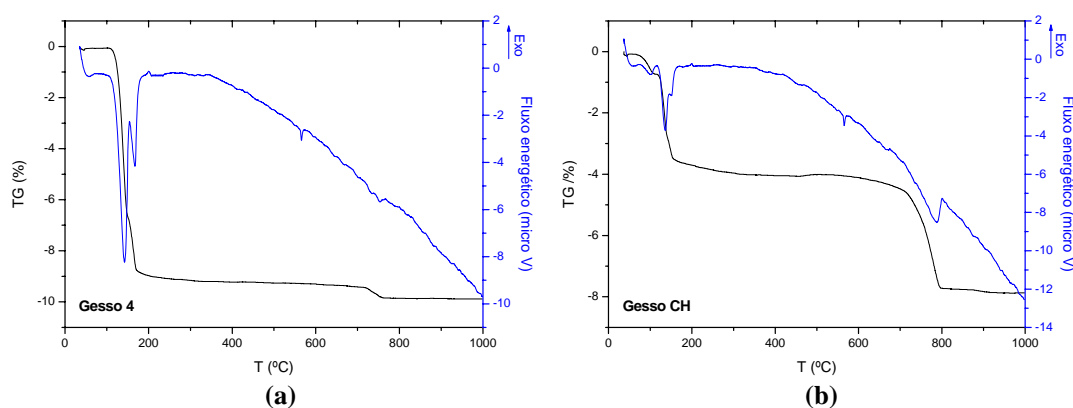


Fig. 25 – Análise ATD/TG das amostras Gesso 4 (a) e Gesso CH (b). Observam-se os picos característicos do gesso aos 120 °C e nas amostras hidráulicas observa-se perda de massa derivada de calcite e compostos hidráulicos.

Para argamassas de gesso bastardas, verifica-se uma grande perda de massa correspondente a gesso e perdas de massa correspondentes a carbonato de cálcio a 750-850 °C (cal) no caso da amostra Gesso Cal, e ainda perdas de massa no intervalo 200-600 °C, correspondentes a compostos hidráulicos, no caso das amostras Gesso CH e Gesso Cim.

A quantificação do gesso mostra-se aproximada aos valores reais, isto é, à percentagem inicial de gesso na mistura (depois de adicionada a água de amassadura). Os valores um pouco superiores ao esperado estão relacionados com o facto de uma percentagem mínima de H₂O perdida nesse intervalo poder estar relacionada com outros compostos vestigiais, que não o gesso. Observa-se também, em argamassas com ligante exclusivamente de gesso, uma perda de massa pouco significativa de CO₂ de alguma cal livre que pode, eventualmente, estar presente.

De forma semelhante à descrita para o gesso é possível quantificar o carbonato de cálcio, tendo em conta que cada molécula de CaCO₃ liberta uma molécula de CO₂. As massas molares de CaCO₃ e CO₂ são 100,0892 e 44,0098 g.mol⁻¹, e as equações que expressam esta relação são:

$$m_{\text{CaCO}_3} = \frac{M_{\text{CaCO}_3}}{M_{\text{CO}_2}} \times m_{\text{CO}_2} \quad (14)$$

$$m_{CaCO_3} = \frac{100,0892}{44,0098} \times m_{CO_2} = 2,27m_{CO_2} \quad (15)$$

A esta massa de $CaCO_3$ vai corresponder uma massa de $Ca(OH)_2$, ou seja, cal hidratada ou portlandite na mistura inicial, depois de adicionada a água de amassadura. A massa molar de $Ca(OH)_2$ é $74,0892 \text{ g.mol}^{-1}$. O cálculo é efectuado da seguinte forma:

$$m_{Ca(OH)_2} = \frac{74,0946}{100,0892} m_{CaCO_3} = 0,74m_{CaCO_3} \quad (16)$$

Já a massa correspondente de compostos hidráulicos é impossível de calcular, pois não se conseguem determinar todos os compostos hidráulicos existentes na argamassa e as respectivas relações molares.

Para argamassas de cal típica é também fácil a análise dos gráficos obtidos, já que só são visíveis perdas de massa significativas a partir dos 700°C . Aqui poderão distinguir-se duas situações: se o pico de calcite se situar no intervalo $750 - 850^\circ\text{C}$ pode considerar-se que ele corresponde a calcite já recarbonatada, ou seja, cal como ligante (amostra Cal 1 – Fig. 26 (a)); se o pico se estender dos 750 aos 950°C está-se na presença de calcite com duas proveniências: ligante de cal e agregados calcários, com grãos de maior dimensão e que, por isso, necessitam de temperaturas ligeiramente superiores para se decomporem (amostra Micro Cal – Fig. 26 (b)).

Em todas as argamassas de cal verificou-se a existência de um pico correspondente à portlandite (exceptuando Cal pura), como já havia sido visto em DRX, o que implica que a cal não está completamente carbonatada aos 90 dias, tempo de cura que a cal tinha no momento da análise. Verifica-se que a percentagem de portlandite é muito elevada na amostra Micro Cal, no entanto essa portlandite não é proveniente dos agregados calcários, já que estes não passam pela fase de recarbonatação.

A contabilização do carbonato de cálcio proveniente da cal pode ser facilmente obtida, como já foi referido, e a da portlandite também, sabendo que a cada molécula de $Ca(OH)_2$ vai corresponder uma molécula de H_2O que se perde por volta dos 480°C .

$$m_{Ca(OH)_2} = \frac{74,0946}{18,0152} m_{H_2O} = 4,1 m_{H_2O} \quad (17)$$

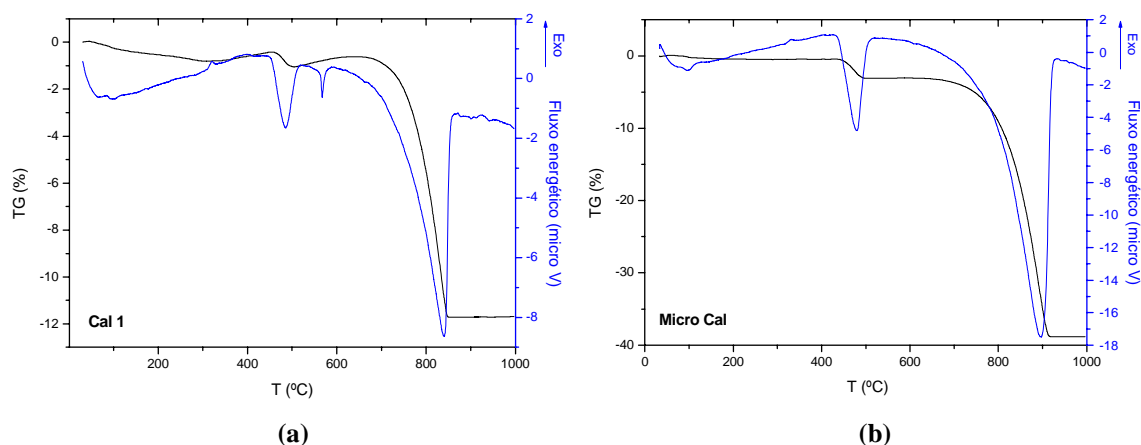


Fig. 26 – Análise ATD/TG das amostras Cal 1 (a) e Micro Cal (b). Observam-se perdas de massa significativas por volta dos 480 °C, correspondentes à desidratação da portlandite, e a partir dos 700 °C, correspondentes à perda de CO₂ do carbonato de cálcio do ligante (a) e do ligante e agregados (b).

A soma das percentagens de portlandite e de cal recarbonatada, depois da conversão para cal hidratada, vai corresponder à percentagem de cal hidratada na mistura inicial. Verificou-se que estes valores dão uma aproximação relativa da realidade, o que prova a fiabilidade deste tipo de análise. Quer isto dizer que o erro na aproximação aos valores de massa reais pode considerar-se mais ou menos sistemático, e pode contar-se sempre com ele em ensaios futuros. Na Tabela 7 apresentam-se os resultados de perda de massa obtidos por termogravimetria nos intervalos de temperatura mais significativos para todas as amostras desenvolvidas laboratorialmente.

Para as amostras com componentes hidráulicos a análise ATD/TG não é tão linear. Verifica-se um aumento percentual da água higroscópica e uma maior perda de água até 200 °C, e é possível contabilizar a percentagem de gesso que foi adicionado a argamassas com cal hidráulica e cimento. De uma forma geral observa-se um aumento de perda de massa no intervalo de temperatura 200-600 °C, juntamente com uma diminuição da perda de massa do carbonato de cálcio, tal como seria de esperar já que este é o principal indicativo da presença de componentes hidráulicos. É possível relacionar estes valores através do índice de hidraulicidade, que exprime inversamente o carácter hidráulico de uma argamassa. No entanto este cálculo só é válido para argamassas sem agregados calcários.

Tabela 7 – Resultados de termogravimetria para as amostras desenvolvidas laboratorialmente. Para as amostras sem agregados calcários (exceptuando as de base de gesso) foi calculada a percentagem total de cal hidratada na mistura, e foi também calculado o índice de hidraulicidade, que reflecte inversamente o carácter hidráulico de uma argamassa. A percentagem de gesso inicial foi calculada para as amostras de base de gesso, cimento e cal hidráulica.

Amostra	<120 °C (%)	120-200 °C (%)	200-600 °C (%)	~480 °C (%)	700-850 °C (%)	750-860 °C (%)	700-950 °C (%)	750-950 °C (%)	% CaSO ₄ ·2H ₂ O	% Ca(OH) ₂	CO ₂ / H ₂ O _{est}
Cal1	0,5	0	0,4	0,7	0	10,7	0	0	-	20,85	26,75
Cal 2	0,3	0	0,5	0,6	0	12,2	0	0	-	22,96	24,40
Cal 3	0,5	0	0,9	0,7	0	17,6	0	0	-	32,44	19,56
B Cal 1	1,7	1,0	3,0	2,2	7,0	0	0	0	6,37	20,80	2,33
B Cal 2	0,7	1,0	1,5	1,0	7,0	0	0	0	6,37	15,87	4,67
B Cal 3	0,4	0,3	0,8	0,6	0	8,0	0	0	1,91	15,90	10,00
B Cal 4	1,9	1,1	3,0	1,5	3,0	0	0	0	7,01	11,20	1,00
CH 1	0,9	0,4	0,8	0,5	12,2	0	0	0	2,55	22,54	15,00
CH 2	1,0	0,2	2,0	2,3	5,8	0	0	0	1,27	18,59	2,90
CH 3	0,8	0,3	1,3	0,8	7,0	0	0	0	1,91	15,05	5,38
CH 4	0,6	0,4	2,8	0	0	5,0	0	0	2,55	8,40	1,78
POZ 1	0,5	0,2	0,6	0,7	0	6,1	0	0	-	13,13	10,17
POZ 2	0,3	0	1,1	1,0	0	6,2	0	0	-	14,62	5,64
POZ 3	0,4	0,2	0,5	0,3	0	2,8	0	0	-	5,93	5,60
Micro Cal	0,5	0	2,8	2,8	0	0	0	34,5	-	-	-
Cho Cal	0,4	0,1	2,4	2,2	0	6,1	0	0	-	19,29	2,54
Cim	1,3	0,7	2,0	0,5	2,2	0	0	0	4,46	5,76	1,10
Micro Cim	1,5	1,0	1,7	0,5	0	0	31,4	0	6,37	-	-
Cho Cim	1,2	1,3	3,5	0,8	3,3	0	0	0	8,28	8,83	0,94
Micro CH	0,8	0,2	1,4	0,3	0	0	35,7	0	1,27	-	-
Cho CH	0,6	0,6	1,4	0	0	5,0	0	0	3,82	8,40	3,57
Gesso 1	0,3	3,4	0,2	0	0	0,3	0	0	21,47	0,49	-
Gesso 2	0,1	3,4	0,3	0	0	0,2	0	0	21,72	0,34	-
Gesso 3	0,1	5,7	0,3	0	0	0,3	0	0	36,44	0,50	-
Gesso 4	0,2	9,0	0,3	0	0	0,4	0	0	57,33	0,70	-
Gesso Cal	0,5	3,4	1,0	0,8	0	9,1	0	0	21,78	18,66	-
Gesso CH	0,8	3,4	0,4	0	3,1	0	0	0	21,53	5,27	-
Gesso Cim	1,6	3,7	1,1	0,4	1,6	0	0	0	23,57	4,26	-
Cal pura	1,7	1,6	2,4	0	0	37,2	0	0	-	62,56	15,50
CH pura	2,0	1,6	3,6	0	18,8	0	0	0	10,19	31,55	5,22
Cim puro	2,8	1,9	5,3	0	7,6	0	0	0	12,10	12,80	2,42

Relembrando a Tabela 3 – Resultados de termogravimetria e rácios $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ típicos para ligantes à base de cal [12,21,63], verifica-se que para índices de hidraulicidade superiores a 10 correspondem argamassas de cal típica, e para valores mais baixos correspondem argamassas hidráulicas. Para as amostras testadas os valores de perda de massa podem não ser tão elevados percentualmente, já que a análise foi feita à amostra como um todo, enquanto que a tabela refere-se apenas à fracção de ligante. No entanto, as relações entre as perdas de massa são semelhantes.

Ao observar a Tabela 7, onde estão também calculados os rácios $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ para as amostras de cal e hidráulicas, verifica-se que na grande maioria dos casos os índices de hidraulicidade calculados estão dentro do esperado. Por exemplo, nas amostras de cal o rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ é igual ou superior a 10, o que mostra uma elevada pureza da cal. As amostras que apresentam rácios mais baixos, e por consequência maior hidraulicidade, são as de cimento, tal como se esperava. No entanto verificam-se algumas excepções. Para a CH 1 calculou-se um índice de hidraulicidade de 15, valor que pode ser desprezado já que esta é uma amostra com 20% de cal e 20% de cal hidráulica; por outro lado, para a Cho Cal o índice hidráulico foi 2,54, o que é impossível tendo em conta que esta é uma formulação apenas de quartzo e cal. As amostras que contêm pozolanas (POZ 2 e POZ 3) apresentam índices hidráulicos próximos de 5, no entanto, como se referiu anteriormente nos resultados de DRX e de resistências mecânicas, estas pozolanas conferem um baixo carácter hidráulico à argamassa. Na Fig. 27 é possível observar a relação entre a massa perdida pela libertação de CO_2 e o rácio $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}_{\text{est}}$ para estas amostras (excluindo as amostras CH 1, Cho Cal, POZ 2 e POZ 3, que não são representativas dos seus tipos de ligante).

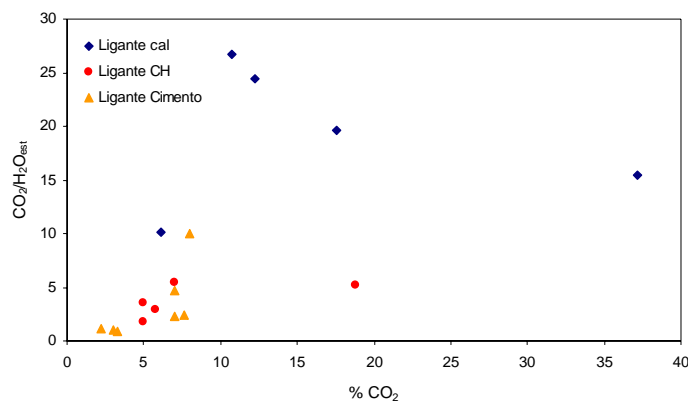


Fig. 27 - Relação entre a percentagem de massa perdida pela libertação de CO_2 e o índice de hidraulicidade para as argamassas desenvolvidas em laboratório.

Um outro aspecto que pode distinguir argamassas de cal típica e argamassas hidráulicas é a existência de uma inflexão no pico endotérmico da calcite (temperaturas superiores a 700 °C), mais ou menos acentuada conforme a proporção de ligante hidráulico relativamente à percentagem de cal, como se pode observar nas Fig. 28 e Fig. 29.

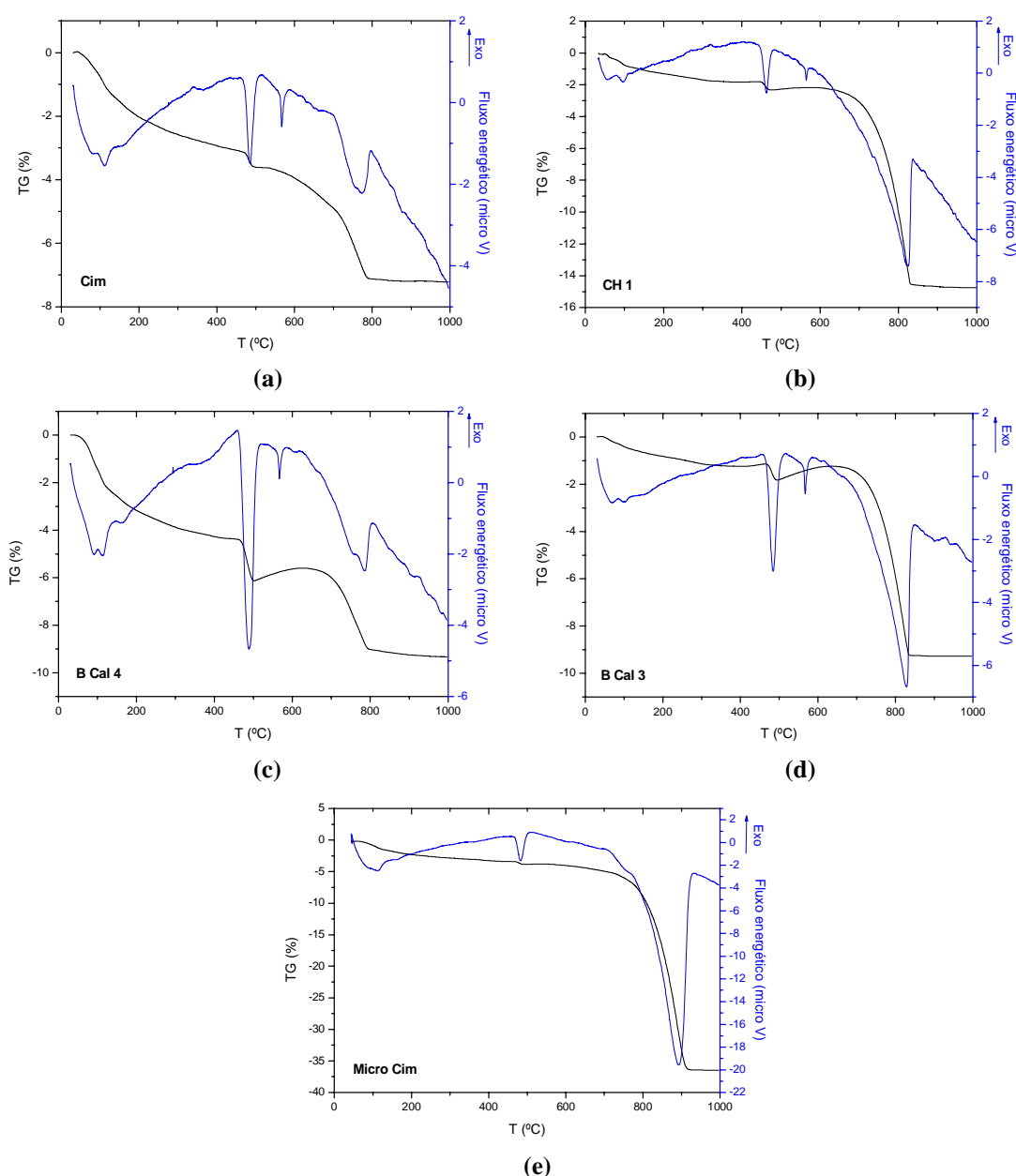


Fig. 28 – Análise ATD/TG das amostras Cim (a), CH 1 (b), B Cal 4 (c), B Cal 3 (d) e Micro Cim (e). As argamassas hidráulicas podem ser diferenciadas por uma ligeira inflexão no pico da calcite, quer as argamassas tenham um ligante apenas de cimento (a), de cal hidráulica (b) ou uma mistura entre cal e um composto hidráulico (c). Se este estiver em muito baixa proporção relativamente à cal (d), a argamassa comporta-se como uma argamassa de cal típica. Em argamassas hidráulicas o pico da calcite pode ainda estender-se até aos 950 °C, caso existam agregados calcários (e).

Esta inflexão existe em todas as argamassas de cimento, cal hidráulica e bastardas de cal e componentes hidráulicos, exceptuando na B Cal 3 pois, apesar de ter cimento, a sua percentagem é tão baixa relativamente à cal (5%) que a sua mistura nem se reflecte num aumento da hidraulicidade da argamassa. O índice hidráulico desta argamassa é 10, o que mostra que uma mistura desta natureza não traz grandes vantagens quando se pretende aumentar a hidraulicidade. As resistências mecânicas baixas, da mesma ordem de grandeza das argamassas de cal aérea, corroboram esta afirmação. A amostra CH 2 (10% cal hidráulica e 20% cal) já apresenta a inflexão no pico da calcite, indicando a presença de ligantes hidráulicos, tal como já havia sido visto em DRX, apesar de os seus valores de resistência mecânica serem semelhantes aos da cal. Quer isto dizer que apesar de já se notar a presença de componentes hidráulicos nesta mistura, estes ainda não estão em proporção suficiente para alterar o comportamento mecânico da argamassa. A presença desta inflexão pode, possivelmente, ser explicada pela existência de dois tipos diferentes de cal, e daí a necessidade de maior absorção de energia para a decomposição de uma delas. A perda de massa é, no entanto, contínua, e não permite diferenciar as duas situações. Este é um aspecto ao qual deverá ser dada maior atenção no futuro.

Poderia pensar-se que esta inflexão corresponde ao dobleto da dolomite, aos 780 e 860°C, no entanto este mineral não é identificado em DRX nas argamassas hidráulicas que apresentam a dita inflexão. Por outro lado, a dolomite é identificada por DRX em Micro Cal, mas nesta não é visível nenhum dobleto ou inflexão no pico da calcite em ATD/TG.

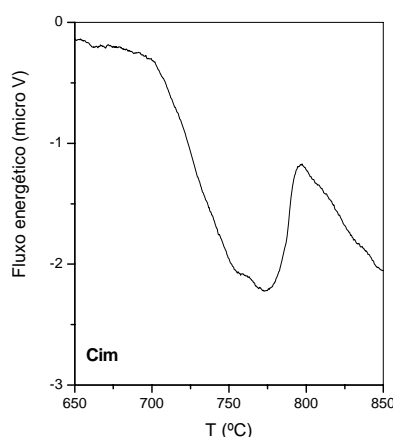


Fig. 29 – Ampliação da análise ATD/TG para a amostra Cim, onde se pode observar em maior pormenor a inflexão no pico da calcite, que indica a presença de compostos hidráulicos.

Desta forma, ao analisar o pico da calcite parece razoável admitir uma distinção de 4 situações generalizadas, ou seja, 4 tipos de picos que fornecem informação relevante sobre a natureza da argamassa:

- 700-850 °C – intervalo de temperatura onde se observa um pico de calcite com uma ligeira inflexão, que provavelmente indica a existência de componentes hidráulicos, o que se reflecte em mais do que um tipo de calcite que se decompõe;
- 750-860 °C – intervalo de temperatura onde se observa a decomposição da calcite proveniente de um ligante de cal sem adição de componentes hidráulicos;
- 700-950 °C – intervalo de temperatura onde se observa a inflexão provavelmente correspondente a componentes hidráulicos, e que se estende até cerca de 950 °C, indicando também a presença de agregados calcários;
- 750-950 °C – intervalo de temperatura correspondente à decomposição de calcite de ligante e de calcite proveniente de agregados calcários.

Por fim refere-se ainda outro pormenor, a existência de portlandite em todas as amostras exceptuando as de ligantes puros (porque passaram pela câmara de carbonatação) e aquelas em que a cal hidráulica é o único ligante. Para este último caso não se conseguiu encontrar uma explicação válida, e seriam necessários outros estudos de carbonatação.

7.2.2 Argamassas antigas e de reabilitação

Numa segunda fase foram caracterizadas amostras de argamassas antigas, recolhidas de edifícios em processo de restauro, e as amostras R 1 e R 2, de composição conhecida, e que servirão para testar a fiabilidade da matriz. Nas tabelas seguintes apresentam-se algumas das propriedades estudadas para este conjunto de argamassas.

Tabela 8 – Descrição visual e distribuição granulométrica de argamassas antigas, R 1 e R 2.

Tipo		Descrição visual	Distribuição granulométrica	
Avanca 1	Reboco estrutural	Amostra com \cong 100 anos, cor de laranja, sugere produtos argilosos. Moagem relativamente difícil. Tem um acabamento branco, que também será analisado separadamente. Grãos agregados de diâmetro elevado ($>2\text{mm}$), mas também com pós finos.	2000	20,3%
			1600	9,7%
			1250	13,6%
			630	19,5%
			315	8,2%
			160	5,1%
			80	8,1%
			<80	14,9%
Avanca 2	Argamassa de alvenaria	Aspecto do tipo argiloso, pós muito finos, aparentam pouquíssimos inertes. Muito fácil de moer, mas os pós aglomeram-se facilmente. Construção posterior à original.	2000	0%
			1600	0%
			1250	0,7%
			630	7,6%
			315	20,2%
			160	10,8%
			80	8,5%
			<80	51,5%
Avanca 3	Argamassa de alvenaria	Aparentemente o ligante é quase exclusivamente argila. Amostras com alguma humidade. Observa-se bem o cascalho. Cor castanha escura. Fácil desagregação, mas difícil moagem (os pós colam-se). Construção posterior à original.	2000	55,4%
			1600	7,4%
			1250	5,8%
			630	7,0%
			315	8,0%
			160	5,3%
			80	4,5%
			<80	6,0%
Avanca 4	Argamassa de alvenaria	Cor castanho-alaranjado. Observam-se areias. Fácil desagregação.	2000	15,0%
			1600	6,7%
			1250	12,5%
			630	29,3%
			315	11,9%
			160	6,0%
			80	6,4%
			<80	11,6%
Avanca 5	Argamassa de alvenaria	Cor laranja pálido. Observam-se os agregados. Mais difícil de desagregar. Construção original (~400 anos).	2000	10,7%
			1600	9,0%
			1250	14,1%
			630	21,7%
			315	7,9%
			160	7,2%
			80	10,3%
			<80	18,3%
Avanca 6	Argamassa de alvenaria	Cor laranja pálido. Muito idêntico a Avanca 5.	2000	11,9%
			1600	7,4%
			1250	12,8%
			630	25,2%
			315	9,9%
			160	7,6%
			80	8,8%
			<80	15,6%

Tabela 8 – Descrição visual e distribuição granulométrica de argamassas antigas, R 1 e R 2.

Tipo		Descrição visual	Distribuição granulométrica	
Avanca acabamento	Reboco exterior	Reboco branco, difícil de destacar. Acompanha o Avanca 1.	2000	0%
			1600	0%
			1250	0%
			630	2,8%
			315	35,8%
			160	24,5%
			80	14,2%
Azurva 2	Reboco estrutural	Amostra com ~ 200 anos, cor amarelo esbatido. Material mais arenoso, de fácil desagregação.	<80	22,6%
			2000	0%
			1600	0%
			1250	0%
			630	3,4%
			315	44,7%
			160	31,5%
Azenha	Argamassa de alvenaria	Amostra com \cong 150 anos. Cor alaranjada. Aparentemente com muitos agregados siliciosos e de grande dimensão. Difícil de destacar.	80	8,6%
			<80	11,5%
			2000	18,4%
			1600	8,7%
			1250	11,5%
			630	30,0%
			315	10,5%
Elvas 1	Reboco estrutural	Cor castanha, aspecto argiloso. Resistência mecânica aparentemente elevada. Elevada proporção de ligante.	160	6,0%
			80	4,6%
			<80	9,6%
			2000	1,1%
			1600	0,8%
			1250	1,6%
			630	16,5%
Elvas 2	Reboco exterior	Cor cinzenta, devido à sua constituição provável de cimento, o que implica uma aplicação moderna. Resistência mecânica aparentemente elevada.	315	25,0%
			160	19,7%
			80	16,2%
			<80	18,7%
			2000	1,3%
			1600	1,6%
			1250	2,8%
Olhão	Argamassa de alvenaria	Cor branca amarelada. Fácil desagregação, aparentemente com muita areia e pouco ligante.	630	23,4%
			315	25,6%
			160	17,7%
			80	12,0%
			<80	14,7%
			2000	3,2%
			1600	4,1%
R 1	Reboco fino	Formulação laboratorial. Pós muito finos, fácil moagem e desagregação. Porosidade elevada.	1250	8,3%
			630	40,9%
			315	26,4%
			160	10,3%
			80	4,6%
			<80	0,9%
			2000	0%
R 2	Reboco grosseiro	Formulação laboratorial. Observa-se alguma porosidade, e baixa granulometria. Aparentemente com pouca areia. Difícil desagregação.	1600	0%
			1250	0,5%
			630	2,0%
			315	13,2%
			160	41,7%
			80	14,7%
			<80	7,5%
			2000	19,9%
			1600	0%
			1250	0,5%
			630	2,0%
			315	13,2%
			160	41,7%
			80	14,7%
			<80	7,5%

Tabela 9 – Resultados da caracterização das amostras de argamassas antigas, R 1 e R 2. * Não se conseguiram cortar provetes por falta de material; # Não se conseguiram cortar provetes porque as amostras não tinham coesão e desfizeram-se no corte; Θ A amostra desfez-se na água durante o teste.

Amostra	ρ_{geom} (g/cm ³)	P(%)	ρ_{satur} (g/cm ³)	% sílica (ataque químico)	R _c (MPa)	R _f (MPa)	ϵ (MPa)	Ensaio aos sais
Avanca 1	1,37	26,1	1,67	69,48	1,58	*	*	Sulfatos: N Cloretos: N Nitritos: N
Avanca 2	1,31	Θ	Θ	25,36	* #	* #	* #	Sulfatos: N Cloretos: N Nitritos: N
Avanca 3	#	Θ	Θ	44,19	* #	* #	* #	Sulfatos: N Cloretos: S Nitritos: N
Avanca 4	1,12	15,0	1,88	52,94	*	*	*	Sulfatos: N Cloretos: S Nitritos: N
Avanca 5	#	15,8	1,46	60,53	* #	* #	* #	Sulfatos: N Cloretos: S Nitritos: N
Avanca 6	1,24	22,5	1,74	62,45	*	*	*	Sulfatos: N Cloretos: S Nitritos: N
Avanca acabamento	*	*	*	60,46	*	*	*	Sulfatos: N Cloretos: N Nitritos: N
Azurva 2	1,51	20,7	1,78	87,48	2,08	*	*	Sulfatos: N Cloretos: S Nitritos: N
Azenha	1,50	17,7	1,73	75,84	1,50	1,36	6539,00	Sulfatos: N Cloretos: N Nitritos: N
Elvas 1	1,46	22,6	1,65	74,04	*	*	*	Sulfatos: N Cloretos: N Nitritos: N
Elvas 2	*	*	*	83,62	*	*	*	Sulfatos: N Cloretos: N Nitritos: N
Olhão	1,30	*	*	80,84	* #	* #	* #	Sulfatos: N Cloretos: S Nitritos: N
R 1	1,20	52,5	1,98	0	1,04	0,43	3550,00	-
R 2	1,18	27,0	2,57	45,51	1,87	0,83	4053,00	-

Em primeiro lugar, refere-se não ter sido possível efectuar ensaios mecânicos na maioria das amostras, quer por falta de material, quer pela fraca coesão que não permitiu cortar provetes, pois as amostras desagregavam-se com facilidade. Para as amostras antigas onde se conseguiram efectuar ensaios mecânicos pode verificar-se uma resistência mecânica relativamente elevada, que fica a dever-se à elevada percentagem de agregados de quartzo, que eram de grande dimensão no caso de Azenha. Estas amostras eram também as que possuíam maior densidade aparente. Nas amostras R 1 e R 2 observa-se uma resistência mecânica mais baixa, já que este é também um dos requisitos destes produtos desenvolvidos para propósitos de restauro. Para R 2 as resistências são mais elevadas devido à sua percentagem de quartzo. Em R 1 não é detectada sílica porque os seus agregados são exclusivamente calcários.

Verifica-se mais uma vez a discrepância entre os resultados obtidos para a densidade quando calculada por métodos diferentes. Os valores obtidos pelo método de saturação para R 1 e R 2 estão influenciados pelo carácter hidrófugo destas argamassas, e por isso não devem ser tidos em conta. As densidades destes produtos são baixas, e pode observar-se uma porosidade de cerca de 50% na amostra de R 1. Neste caso, considera-se mais representativa a densidade obtida pelo método geométrico.

No ensaio aos sais resultantes de degradação apenas uma minoria das amostras apresentaram cloretos, e menos ainda, nitratos. Os produtos R 1 e R 2 não foram testados neste ensaio porque não foram colocados em condições adversas.

Na análise DRX das argamassas antigas (Tabela 10) verifica-se uma predominância de calcite e quartzo, o que está de acordo com o esperado visto que estes eram os materiais mais utilizados em argamassas de construção antes do aparecimento do cimento. É também possível notar a existência de compostos argilosos e feldspatos, e em Avanca 2 as argilas substituem a cal na sua função como ligante (Fig. 30(a)). Estas são, aliás, o componente dominante, de acordo com as observações a olho nú e com os resultados de ataque químico, onde o resíduo insolúvel indica uma percentagem de apenas 25% de quartzo. Em Avanca 6 estima-se também a presença de compostos argilosos, apesar de estes não terem sido detectados nesta análise. A sua cor alaranjada, idêntica a Avanca 5, conduz a esta consideração. O mesmo acontece para Azenha. Alguns compostos argilosos podem não ser

detectados em DRX devido ao seu baixo grau de cristalinidade. No entanto, é possível confirmar uma prática generalizada do uso de argilas misturadas com cal, mesmo em zonas do país e em épocas distintas. Em todas as amostras de Avanca, excepto Avanca acabamento, que correspondem a várias fases de construção do mesmo edifício, nota-se uma semelhança geral, o que indica um cuidado da parte do operador de cada uma das fases em usar materiais idênticos. Na amostra de Avanca acabamento (Fig. 30(b)) verifica-se um ligante quase exclusivamente de cal, apenas com alguns feldspatos vestigiais provavelmente originados por contaminações do reboco estrutural ou da areia, justificando a sua cor branca. Este material foi colocado como revestimento sobre Avanca 1, que funciona como reboco estrutural. Tem por isso uma função maioritariamente estética.

Tabela 10 – Análise mineralógica por DRX das argamassas antigas, R 1 e R 2. Calcite: CaCO_3 ; Portlandite: Ca(OH)_2 ; Quartzo: SiO_2 ; Dolomite: $\text{CaMg(CO}_3)_2$; Microclina: KAlSi_3O_8 ; Halite: NaCl ; Caulinite: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$; Moscovite: $(\text{K,Ca,Na})(\text{Al,Mg,Fe})_2(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$; Illite: $\text{K}_x(\text{Al,Mg})_4(\text{Si,Al,Fe}^{3+})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_4$; Anite: $\text{K}_2(\text{Fe,Mn,Mg})_5\text{Si}_8\text{O}_{20}(\text{F,OH})_4$; Albite: $(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})_3\text{O}_8$; Anortite: $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$; Actinolite: $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe}_2)_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$; Talco: $\text{Mg}_3(\text{Si}_2\text{O}_5)_2(\text{OH})_2$; Silicato dicálcico: Ca_2SiO_4 .

Amostra	Constituição
Avanca 1	Calcite, quartzo, microclina
Avanca 2	Quartzo, microclina, moscovite, caulinite
Avanca 3	Calcite, quartzo, moscovite, halite
Avanca 4	Calcite, quartzo, moscovite, halite
Avanca 5	Calcite, quartzo, microclina
Avanca 6	Calcite, quartzo
Avanca acabamento	Calcite, quartzo, microclina
Azurva 2	Calcite, quartzo, microclina, ilite
Azenha	Calcite, quartzo
Elvas 1	Calcite, quartzo, dolomite, anortite, actinolite, talco
Elvas 2	Calcite, quartzo, microclina, moscovite, albite
Olhão	Calcite, quartzo, halite
R 1	Calcite, dolomite, portlandite, anite
R 2	Calcite, portlandite, quartzo, dolomite, silicato dicálcico

Na amostra de Olhão são detectados a calcite e o quartzo, como se esperava pelas observações visuais, e halite, justificada pela grande proximidade de um ambiente marítimo. Nas amostras de Elvas 1 e 2 observam-se vários minerais à base de alumínio e

silício, que podem apresentar hidraulicidade. Em Elvas 2 não são detectados compostos próprios de compostos hidráulicos modernos, ao contrário do que se perspectivou durante as observações visuais devido à cor acinzentada que esta amostra apresentava.

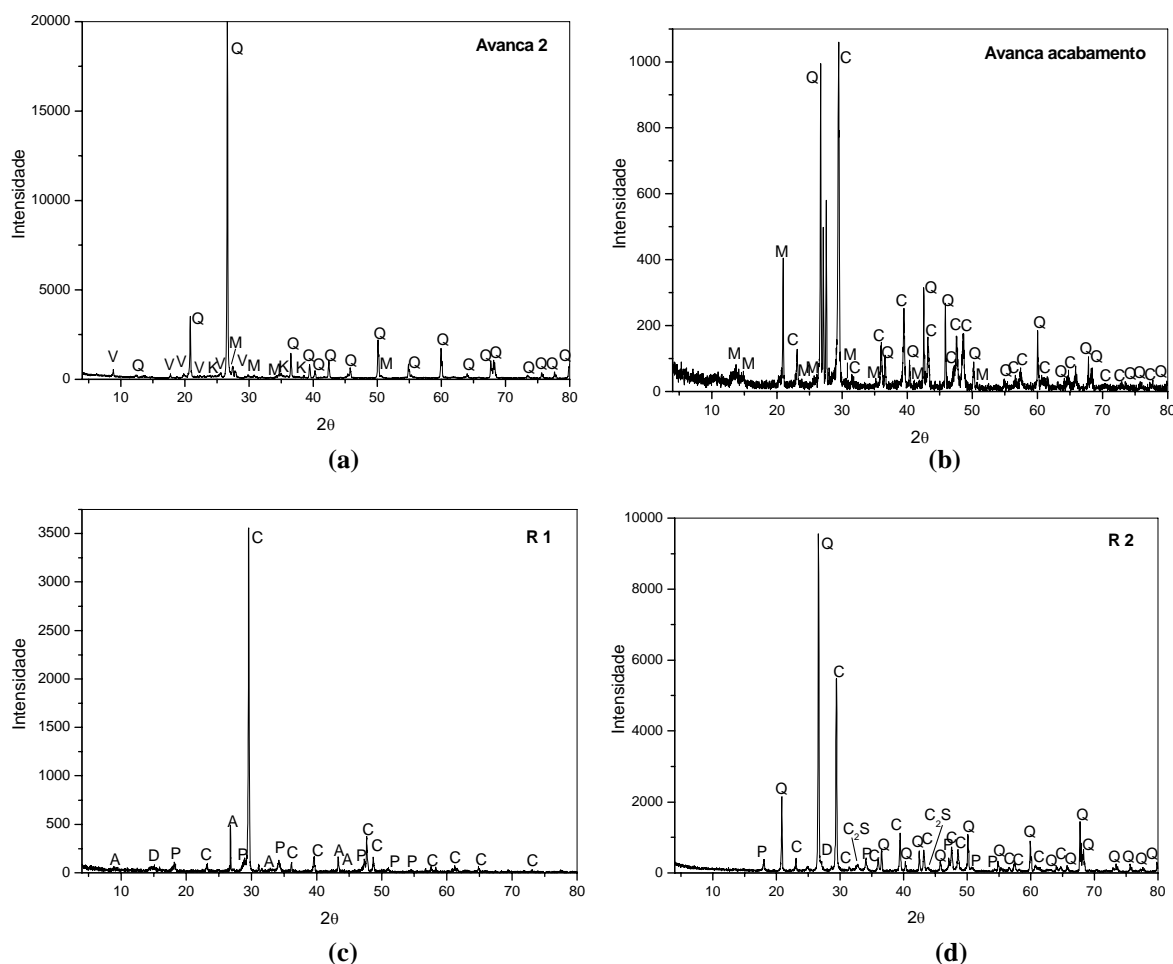


Fig. 30 – Difractogramas das amostras Avanca 2 (a), Avanca acabamento (b), R 1 (c) e R 2 (d). Calcite: C; Quartzo: Q; Portlandite: P; Microclina: M; Moscovite: V; Caulinite: K; Dolomite: D; Anite: A; Silicato dicálcico: C_2S .

Relativamente às amostras R 1 e R 2 (Fig. 30 (c) e (d)), os resultados são os esperados, ou seja, calcite para o primeiro, e ausência total de quartzo, e calcite para o último, também com algumas impurezas, quartzo e silicato dicálcico. Um dos constituintes do R 2 é o cimento, o que justifica a presença desta fase resultante da sinterização parcial do cimento. A calcite, para ambas as amostras, é proveniente de ligante de cal e agregados calcários, o que leva a picos de calcite com elevada intensidade. Verifica-se, pelos picos de dolomite, que a cal utilizada em ambos os produtos é uma cal com alguma percentagem de magnésio, ou seja, é uma cal de baixa pureza, como já havia sido observado em Micro Cal. Tendo em

conta este aspecto pode concluir-se que a contaminação de magnésio está relacionada com os agregados calcários.

A análise térmica diferencial/termogravimetria confirma em muitos aspectos os resultados obtidos com as técnicas anteriores. No entanto salta à vista uma grande desigualdade relativamente aos gráficos de ATD/TG das amostras preparadas em laboratório. Os gráficos das amostras antigas apresentam uma interferência muitíssimo maior, o que pode dificultar, de certa forma, a análise. Estas interferências podem dever-se a mecanismos de degradação que as argamassas sofreram, a deposição posterior de outros materiais e, principalmente, como se tratam de materiais manuseados de uma forma artesanal, a impurezas usadas no fabrico da argamassa, como argilas que são misturadas, propositadamente ou não, com a cal.

Durante a recolha das amostras verificou-se que quase todos os exemplares de Avanca continham muita humidade, o que originou dificuldades de moagem. É possível verificar na Tabela 11 que a temperaturas inferiores a 120 °C houve perda significativa de massa que se deve à remoção da água fisicamente adsorvida. Observa-se também que as argamassas que libertam maior massa de água adsorvida até 120 °C são as que apresentam maior porosidade, e que por isso suportam maior quantidade de água na sua estrutura. Este facto chama a atenção para a importância da recolha das amostras, já que estas devem ser retiradas, preferencialmente, de uma parte superior do edifício para evitar fenómenos de capilaridade demasiado intensos e que não são representativos da argamassa como um todo.

Outro aspecto que se pode salientar em praticamente todas as amostras é que, apesar de algumas serem bastante antigas (até 400 anos), é visível uma pequena percentagem de portlandite. As amostras que são excepção são Avanca 2 (Fig. 31 (b)), que aliás não apresenta calcite mesmo na forma recarbonatada, o que confirma a utilização de um único componente como ligante, ou seja, argilas como já havia sido referido nos resultados de DRX, R 2, que apresenta um pico endotérmico aos 480 °C no gráfico ATD/TG, mas cuja perda de massa é impossível de contabilizar, já que se regista uma ligeira subida de massa para a qual não foi encontrada explicação, Avanca acabamento, Elvas 1 e Elvas 2. Em Avanca 3 e 4 apenas se observa portlandite, e ausência de calcite recarbonatada.

Tabela 11 – Resultados de ATD/TG para as argamassas antigas, R 1 e R 2. Para as amostras sem agregados calcários foram calculados a percentagem total de cal hidratada, que corresponde à percentagem de cal na mistura inicial, ou seja, com a água de amassadura, e o índice de hidraulicidade.

Amostra	<120 °C (%)	120-200 °C (%)	200-600 °C (%)	~480 °C (%)	700-850 °C (%)	750-860 °C (%)	700-950 °C (%)	750-950 °C (%)	% Ca(OH) ₂	CO ₂ / H ₂ O _{est}
Avanca 1	1,9	1,4	4,5	0,8	0	8,2	0	0	17,06	1,82
Avanca 2	1,2	0,4	2,3	0	0	0	0	0	0	-
Avanca 3	0,7	0,2	2,9	0,8	0	0	0	0	3,08	-
Avanca 4	1,4	0,2	4,4	1,5	0	0	0	0	6,16	-
Avanca 5	1,0	0,2	3,2	0,3	0	0,8	0	0	2,66	0,25
Avanca 6	1,6	0,2	1,1	0,2	1,5	0	0	0	3,55	1,36
Avanca acabamento	0,3	0,2	3,0	0	0	13,0	0	0	21,84	4,30
Azurva 2	0,3	0,1	1,5	0,2	1,5	0	0	0	3,26	1,00
Azenha	0,2	0,1	1,0	0,2	0,7	0	0	0	2,17	0,70
Elvas 1	0,9	0,4	0,7	0	0	0	0	0	0	-
Elvas 2	0,4	0,3	1,3	0	0	1,1	0	0	1,78	0,84
Olhão	0,5	0,1	1,1	0,1	0	2,5	0	0	4,72	2,35
R 1	0,6	0,6	1,5	0,8	0	0	0	30,0	-	-
R 2	0,6	0,4	2,1	-	0	0	18,1	0	-	-

De uma forma geral observa-se uma baixa percentagem de cal nas amostras de argamassas antigas, o que está de acordo com o seu aspecto laranja-acastanhado que sugere compostos argilosos, possivelmente hidráulicos. Em Avanca acabamento (Fig. 31 (c)) a percentagem de calcite é mais elevada, tal como seria de esperar pois esta é uma argamassa exterior, cuja principal função é, provavelmente, estética, justificando a sua cor branca. Em Olhão a percentagem de calcite é também mais elevada, se tivermos em conta a baixa proporção de compostos correspondentes a outros intervalos de temperatura. Estes resultados estão em concordância com os resultados de DRX. As amostras Avanca 6 e Azenha (Fig. 31 (d)) apresentam compostos argilosos, identificados no intervalo 200-600 °C, apesar de por DRX só ter sido detectada cal e quartzo. No entanto, como já foi referido, o seu aspecto visual já fazia antever, à partida, a presença de argilas. A amostra Elvas 1 não apresenta picos de calcite ou de portlandite, e a perda de massa é mais ou menos constante, tal como acontece em Avanca 2. No entanto, para Elvas 1 são detectados picos de calcite e dolomite em DRX. O pico do quartzo também não é detectado em ATD/TG para esta amostra.

Em R 1 e R 2 (Fig. 31 (e) e (f)) a percentagem de calcite é mais elevada, e observa-se que os picos endotérmicos da decomposição de CaCO_3 se estendem até perto dos 950 °C, o que sugere, mais uma vez, a presença de agregados calcários. Os agregados de natureza siliciosa podem ser identificados em todos os ensaios exceptuando R 1, como seria de esperar. Em R 2 observa-se a inflexão já referida para amostras anteriores correspondente a cimentos ou cal hidráulica. Consegue também visualizar-se uma ligeira inflexão para as amostras Avanca 6, Azurva 2 e Azenha. Este aspecto pode indicar um processamento diferente relativamente às restantes amostras de argamassas antigas, já que poderão ter sido efectuadas misturas de cal e argilas antes da calcinação, o que levou à produção de cal hidráulica, de acordo com os pressupostos efectuados anteriormente quanto à natureza deste tipo de picos. Observa-se, desta forma, um conhecimento por parte dos produtores de argamassas das vantagens da adição de argilas à cal. Relativamente ao índice de hidraulicidade observam-se resultados muito baixos, ou seja, elevados níveis hidráulicos. Infelizmente não é possível comparar estes resultados com as propriedades mecânicas das argamassas devido à escassez de amostras para ensaios mecânicos.

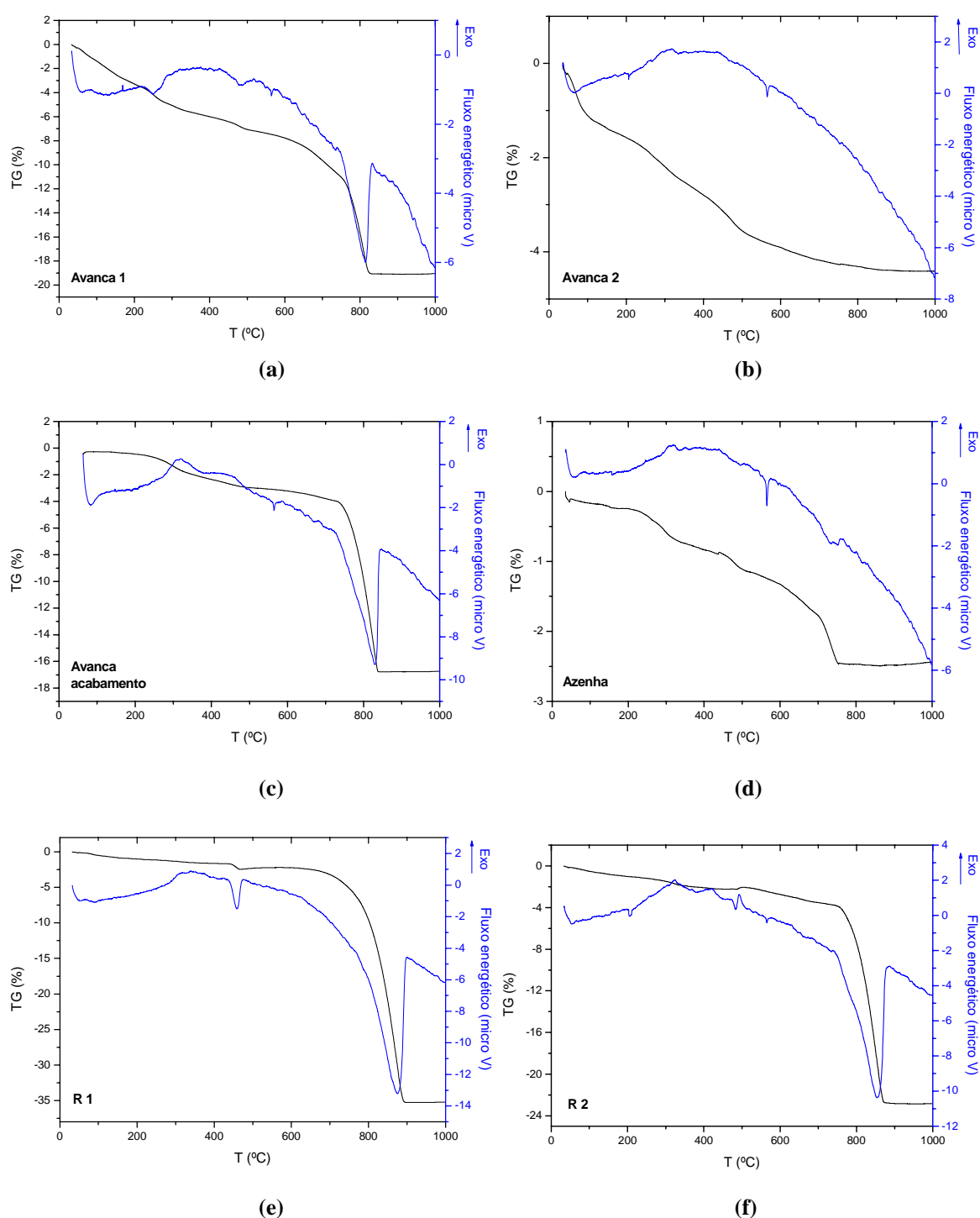


Fig. 31 – Análises ATD/TG das amostras Avanca 1 (a), Avanca 2 (b), Avanca acabamento (c), Azenha (d), R 1 (e) e R 2 (f). Em Avanca 1 (a) observam-se perdas de massa de ligantes argilosos e de calcite, enquanto que em Avanca 2 (b) apenas se verificam perdas de massa significativas no intervalo 200-600 °C. Em Avanca acabamento (c) a perda de massa é principalmente da cal, e em Azenha (d) é possível observar picos ou bandas exotérmicas correspondentes a matéria orgânica. Em R 1 (e) e R 2 (f) verifica-se a existência de agregados calcários, e neste último é visível a presença de cimento pela ligeira inflexão no pico endotérmico da calcite.

Um aspecto final a salientar é que se observam alguns indícios de matéria orgânica nas amostras Avanca acabamento, Azurva 2 e Azenha, que pode ser identificada através de picos exotérmicos no intervalo 300-500 °C. A existência desses indícios poderia ser considerada natural dada a natureza dos materiais, a idade e a localização dos edifícios de onde foram retiradas as amostras. É ainda de esperar alguma matéria orgânica em R 1 e R 2, pois sabe-se que estas foram adicionadas de adjuvantes orgânicos. É possível verificar este aspecto pela presença de um pico ligeiro aos cerca de 300 °C para ambas as amostras.

Em jeito de resumo, e tendo em conta as técnicas utilizadas para a caracterização das argamassas antigas é possível verificar em Avanca 1 que a sua descrição visual pode sugerir alguma hidraulicidade, que no entanto não pode ser confirmada. Apesar de a presença de argilas ter sido identificada por DRX e por ATD/TG, estas provavelmente foram adicionadas à cal já depois de esta ter sido calcinada, e não há garantia de que tenham havido reacções hidráulicas entre a calcite e os compostos alumino-siliciosos provenientes das argilas, que neste caso só poderiam ser confirmadas se se pudessem comparar propriedades mecânicas. O cálculo da percentagem de cal hidratada sugere uma proporção inicial de cerca de 20% na mistura inicial, ao qual é adicionada a areia de sílica (cerca de 70% da amostra em seco), ficando o resto a dever-se a compostos argilosos.

Em Avanca 2 não é identificada calcite, e conclui-se que o ligante utilizado é essencialmente argiloso (argilas identificados em DRX), e que este é utilizado em grande proporção, já que a percentagem de agregados de sílica é apenas 25%. As amostras Avanca 3 e 4 são muito idênticas a esta, mas já se consegue identificar uma presença subtil de portlandite por ATD/TG e calcite por DRX. Este facto pode ser explicado pelo facto de a humidade presente durante a recolha das amostras ter sido evaporada antes dos ensaios de DRX. Estas observações estão de acordo com as descrições visuais efectuadas. Também para estas amostras não é possível confirmar hidraulicidade, pelas mesmas razões já referidas para Avanca 1.

As amostras Avanca 5 e 6 são também bastante idênticas na análise ATD/TG, no entanto pode observar-se uma inflexão no pico de calcite para Avanca 6, o que evidencia a presença de cal hidráulica. Contudo, os resultados de DRX estão um pouco em desacordo com estes aspectos, já que só é identificado um tipo de argila para Avanca 5, enquanto que

em Avanca 6 apenas são identificados quartzo e calcite. Essa inflexão no pico pode sugerir condições de processamento diferentes, ou seja, a adição de argilas à cal é feita antes da calcinação, e com a subida da temperatura são formados, em combinação com a cal, compostos hidráulicos amorfos que não podem ser identificados por DRX. No entanto, tanto os resultados de caracterização física como as observações durante a recolha das amostras sugerem origem semelhante, já que são ambas pertencentes à construção inicial do edifício, apresentam percentagens de agregados siliciosos e distribuições granulométricas muito idênticas, e os seus aspectos visuais são muito semelhantes.

Em Azurva 2 e Azenha as considerações são semelhantes às feitas para Avanca 6, já que em Azenha também não são identificados picos de compostos argilosos por DRX. É identificada uma cal hidráulica que proporciona uma melhor resistência mecânica às argamassas (Azurva 2 e Azenha tinham resistência e coesão suficientes para se conseguirem cortar provetes para os ensaios mecânicos), que também está relacionada com a elevada percentagem de quartzo.

A amostra Avanca acabamento possui uma percentagem elevada de cal, de acordo com a sua cor branca, e o valor calculado de cal hidratada, cerca de 22% da amostra inicial, em húmido, está também de acordo com o valor determinado para a percentagem de agregados siliciosos (60% da amostra em seco), tendo em conta o erro mais ou menos sistemático que já se havia verificado nas amostras preparadas em laboratório para o cálculo de perdas de massa em ATD/TG. A pequena percentagem de argila identificada em DRX e em ATD/TG pode ser explicada pelo uso de cal ou areias impuras e por algumas contaminações do reboco estrutural hidráulico (Avanca 1) sobre o qual o acabamento estava aplicado. As mesmas considerações podem ser feitas para a amostra Olhão, que apesar de ser uma argamassa de alvenaria é constituído maioritariamente por cal e areia siliciosa. A baixa percentagem de cal calculada está também de acordo com a percentagem de sílica obtida (cerca de 80%), e podem observar-se algumas impurezas no intervalo 200-600 °C.

Em Elvas 1 verifica-se que os resultados obtidos em DRX e ATD/TG são um pouco contraditórios, já que em ATD/TG não é detectado qualquer pico de carbonato de cálcio, portlandite ou quartzo e em DRX são visíveis picos, embora de baixa intensidade, de calcite e dolomite, e picos de grande intensidade de quartzo. Este aspecto pode estar relacionado com a heterogeneidade desta amostra, que pode influenciar negativamente os

ensaios, pois estes necessitam de quantidades muito pequenas de amostra, e por vezes pode analisar-se uma fracção que não é representativa da amostra como um todo. Em Elvas 2 os resultados de ATD/TG e DRX são concordantes, e verifica-se que os compostos argilosos encontram-se na amostra em maior proporção que a cal.

Por fim, as amostras de R 1 e R 2 mostram picos alargados de calcite em ATD/TG, provando a existência de agregados calcários. Em R 2 observa-se uma inflexão no pico de calcite que se deve à presença de cimento, cujos componentes são identificados também em DRX. Com estas observações é possível concluir que R 1 é constituída por um ligante de cal e agregados de origem calcária. Por sua vez, R 2 é constituída por cal e cimento, enquanto que os agregados são uma mistura de areias siliciosas e calcários em menor quantidade. Como já foi referido, as suas porosidades são elevadas e as propriedades mecânicas baixas, tal como se pretende para argamassas de restauro.

Verifica-se desta forma que as técnicas utilizadas são adequadas para uma boa caracterização destas argamassas já que, sendo R 1 e R 2 argamassas de composição química conhecida, apresentaram os resultados esperados. Com todas estas considerações fica provada mais uma vez a necessidade da conjugação das várias técnicas de caracterização visual, químicas, físicas e mecânicas, já que muitas propriedades das argamassas passariam despercebidas caso não fossem avaliadas sobre várias perspectivas.

Depois de realizada toda a caracterização, quer para as argamassas antigas, quer para as preparadas em laboratório, é possível passar à fase de preparação da matriz, que será descrita de seguida.

7.3 Processos de decisão para a criação da matriz informatizada

Em primeiro lugar, a criação da matriz passa por uma fase de decisão sobre quais as propriedades mais determinantes para a caracterização de uma argamassa, quais as características que se devem valorizar em primeiro lugar para processos de conservação e restauro e sobre os ensaios que melhor se ajustam a estas necessidades, tendo em conta a disponibilidade e a viabilidade económica dos mesmos. Tendo em atenção os resultados obtidos na caracterização das amostras, definiu-se que a análise térmica diferencial/termogravimetria e a difracção de raios X são as técnicas de caracterização que irão, em primeiro lugar, fornecer a informação fundamental para o processo de decisão da matriz quando esta efectua uma correspondência entre uma argamassa antiga e uma de restauro, cujas características químicas, físicas e mecânicas estão colocadas numa base de dados na matriz.

Para tal, foram definidos os aspectos mais importantes a salientar em cada uma destas técnicas. Esta decisão foi feita com base nas observações da caracterização das amostras desenvolvidas em laboratório, já que estas eram amostras de constituição química bem conhecidas, testando-se assim o grau de certeza dos resultados obtidos. Refere-se, no entanto, que a caracterização que foi feita nunca teria sido completa se as várias técnicas não tivessem sido complementadas entre si.

A análise térmica diferencial é uma técnica valiosa que permite uma informação qualitativa e semi-quantitativa dos constituintes de uma argamassa. Os intervalos de temperatura mais importantes numa análise deste tipo são, como já foi referido anteriormente: $T < 120\text{ }^{\circ}\text{C}$; $120 < T < 200\text{ }^{\circ}\text{C}$; $200 < T < 600\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T \approx 480\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $700 < T < 950\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Neste último intervalo foram diferenciadas quatro situações, como foi referido na secção 7.2.1 - Amostras preparadas em laboratório, mas para a criação da matriz consideraram-se apenas dois intervalos, $700 < T < 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $700 < T < 950\text{ }^{\circ}\text{C}$, conforme a decomposição da calcite seja proveniente exclusivamente de ligantes com carbonato de cálcio, ou seja simultaneamente de ligantes e agregados calcários. Esta distinção foi tida em conta pelo facto de a inflexão que indica a presença de compostos hidráulicos não ser recíproca, ou

seja, a inexistência desta inflexão não corresponde a uma certeza da ausência destes compostos, que podem estar omitidos devido à sua baixa proporção na mistura.

O que se pretende em primeiro lugar na matriz é que, depois de uma análise cuidada dos gráficos ATD/TG, se possam introduzir os valores decimais de perda de massa correspondentes a cada um destes intervalos em campos apropriados. Refere-se que foi dado um peso superior aos intervalos $200 < T < 600$ °C, $700 < T < 860$ °C e $700 < T < 950$ °C, de modo a que estes possam ser factores de maior importância para a decisão da matriz.

Por outro lado, pode efectuar-se uma comparação directa entre os gráficos ATD/TG da argamassa antiga e das amostras inseridas na base de dados. Se para cada amostra for anexado o gráfico TG (perda de massa) correspondente é possível fazer uma comparação ponto por ponto. A matriz mostra de imediato o gráfico mais aproximado. No entanto, é necessário garantir que os ensaios (da argamassa antiga e das argamassas da base de dados) são efectuados nas mesmas condições para que a comparação seja válida. Como foi referido na secção anterior, os gráficos obtidos para as amostras de argamassas antigas apresentam muitas interferências comparativamente aos das argamassas preparadas em laboratório, o que pode induzir em erro a comparação e aproximação gráfica.

O utilizador deve escolher qual o tipo de análise que quer fazer: (i) se introduzindo valores de perda de massa para os intervalos definidos ou (ii) comparando gráficos TG. Se escolher esta última opção é possível carregar um ficheiro de texto com todos os dados directamente na matriz, e esta fará uma média ponderada de valores para cada grau de temperatura, efectuando a comparação até concluir qual a argamassa da base de dados com o gráfico mais próximo do gráfico da amostra que se está a analisar. O utilizador tem a opção de fazer a comparação num intervalo de temperaturas escolhido, ou seja, pode dar mais importância a um determinado intervalo de temperaturas.

A difracção de raios X permite confirmar a análise ATD/TG em muitos aspectos, embora de uma forma apenas qualitativa. Esta técnica vai confirmar a existência de compostos hidráulicos, já que alguns picos podem ser diferenciados, e a existência de agregados de sílica ou de calcário. Neste caso existirão quatro opções, referentes ao tipo de ligante, em que apenas se pode escolher uma delas: (i) cal, (ii) gesso, (iii) cimento/cal hidráulica ou (iv) não considerar.

Esta escolha é eliminatória relativamente aos ligantes que não foram escolhidos. Se não houver certeza quanto à natureza do ligante deve escolher-se a última opção, ou seja, não considerar esta técnica como válida na procura na base de dados. Neste caso a procura será feita em todas as amostras, independentemente do tipo de ligante.

Escolheu-se ainda uma outra característica decisiva na fase inicial da matriz: a percentagem de sílica obtida pelo método de ataque químico com ácido clorídrico. Esta informação auxilia à projecção da proporção de constituintes na argamassa. Este campo será também preenchido em valores decimais.

Por fim, a aplicação da matriz deve ser capaz de, depois de introduzida toda esta informação, calcular a melhor correspondência através de um método de cálculo das distâncias vectoriais a todas as amostras contidas na base de dados, sendo considerado o mais próximo o que apresentar a menor distância. Este método será descrito em Anexo, onde também serão feitas referências ao processo de programação da aplicação de base da matriz propriamente dita. Realça-se ainda que o não preenchimento de algum campo nesta fase poderá ser tido como um gerador de erros muito importante.

A matriz mostrará, por ordem de maior aproximação, as amostras da base de dados que mais se assemelham à amostra antiga que se está a analisar, podendo o operador decidir qual delas acha mais adequada para os propósitos em questão. Estas amostras serão apresentadas como traços característicos, ou seja, mostrando o tipo de constituintes e as suas proporções. É necessário algum discernimento da parte do mesmo para observar alguns factores que podem induzir erros em todo o processo.

O operador pode consultar informação mais detalhada sobre cada uma das amostras escolhidas pela matriz, como densidade aparente, densidade geométrica, propriedades mecânicas e de porosidade, para que este possa ser também um factor de decisão. Seguir-se-á uma nova fase de preenchimento, onde o operador deve introduzir o mesmo tipo de informação sobre a argamassa antiga, informação essa que não entra para o processo de decisão do traço mas que é essencial para uma caracterização completa e para uma comparação mais fácil. Outro tipo de informação que deve estar sempre presente, apesar de

não ser introduzida na matriz, é a descrição visual da amostra antiga, a sua distribuição granulométrica e o tipo de sais presentes.

Por fim, estará disponível a opção de imprimir uma folha onde se poderão observar as características de ambas as argamassas: a antiga e a da base de dados. Desta forma, poderão ser ajustadas algumas propriedades, quer pela manipulação dos materiais constituintes quer pela adição de adjuvantes que não sejam prejudiciais para a estrutura do edifício em restauro. Existirá ainda uma opção para armazenar a informação referente à amostra que se está a analisar na base de dados, caso se pretenda que esta possa, para amostras futuras, entrar no processo de decisão da matriz.

Está assim criada a matriz, à qual se deu o nome de ***The Wall***. Com todo este processo garante-se que a argamassa de restauro preparada é compatível com a argamassa antiga em termos químicos, mecânicos e estéticos.

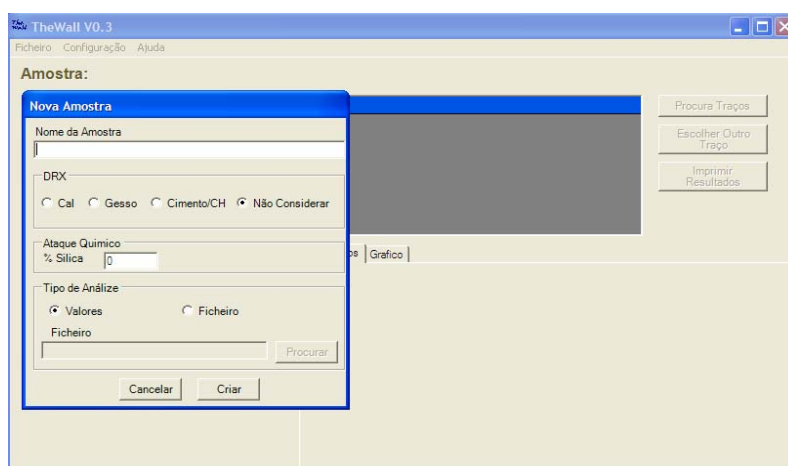


Fig. 32 – Perspectiva da página inicial do programa *The Wall*

7.4 Teste à fiabilidade da matriz

Para testar a fiabilidade da matriz foram analisadas duas amostras conhecidas, R 1 e R 2, desenvolvidas em laboratório propositadamente para serem usadas em conservação e restauro. Foram também analisadas as amostras de argamassas antigas, de forma a verificar qual o tipo de argamassa de restauro mais compatível para cada caso. A análise foi efectuada apenas através da inserção de valores, e não por comparação de gráficos TG porque, como já foi referido anteriormente, os gráficos das argamassas antigas apresentam muitas interferências que podem induzir em erro o processo de procura. As características de cada amostra foram introduzidas na matriz, tendo em conta os resultados e o respectivo grau de certeza da caracterização efectuada. Na Tabela 12 observam-se as cinco argamassas da base de dados mais aproximadas para cada amostra testada e as respectivas distâncias.

Para a maioria das amostras verifica-se que as distâncias calculadas são pequenas, o que indica que as amostras criadas em laboratório para a base de dados satisfazem as exigências de compatibilidade entre argamassas antigas e de restauro. De qualquer forma, as maiores distâncias que são observadas em alguns casos não são necessariamente um ponto desfavorável, já que a base de dados pode ser constantemente actualizada com novas amostras para servir de forma cada vez mais fiável todos os tipos de argamassas.

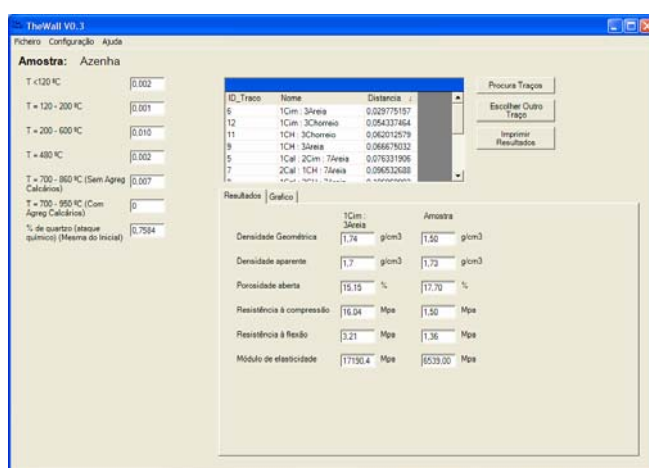


Fig. 33 – Perspectiva do programa *The Wall* com os resultados obtidos para a amostra Azenha.

Tabela 12 – Resultados calculados pela matriz para as 5 primeiras aproximações para as amostras de argamassas antigas, R 1 e R 2.

Amostra	1ª Aproximação (Distância)	2ª Aproximação (Distância)	3ª Aproximação (Distância)	4ª Aproximação (Distância)	5ª Aproximação (Distância)
Avanca 1	2Cal : 1Cim : 7Areia (0,047739)	1Cal : 2CH : 7Areia (0,051040)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,053657)	2Cal : 1Poz : 7Areia (0,059959)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,077091)
Avanca 2	100% Cim (0,279550)	1Cal : 1Cim : 3Areia (0,361159)	100% CH (0,379550)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,448881)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,454484)
Avanca 3	1Cal : 1Cim : 3Areia (0,187504)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,262091)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,271550)	2Cal : 1Cim : 7Areia (0,277264)	1Cal : 2CH : 7Areia (0,277362)
Avanca 4	1Cal : 1Cim : 3Areia (0,123686)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,177207)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,192521)	2Cal : 1Cim : 7Areia (0,201803)	1Cal : 2CH : 7Areia (0,202268)
Avanca 5	1Cal : 1Cim : 3Areia (0,093538)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,101336)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,121140)	2Cal : 1Cim : 7Areia (0,131814)	1Cal : 2CH : 7Areia (0,132012)
Avanca 6	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,084447)	1Cal : 1Cim : 3Areia (0,088528)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,100186)	1Cal : 2CH : 7Areia (0,108900)	2Cal : 1Cim : 7Areia (0,109504)
Avanca acabamento	1Cal : 1Poz : 3Areia (0,103673)	1Cal : 1Areia (0,126933)	2Cal : 1Poz : 7Areia (0,138474)	1Cal : 3Areia (0,153649)	2Cal : 0,5Cim : 7,5Areia (0,164764)
Azurva 2	1Cim : 3Areia (0,125968)	1Cim : 3Chorreio (0,131469)	1CH : 3Chorreio (0,134406)	1CH : 3Areia (0,135591)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,178830)
Azenha	1Cim : 3Areia (0,029775)	1Cim : 3Chorreio (0,054337)	1CH : 3Chorreio (0,062012)	1CH : 3Areia (0,066675)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,076332)
Elvas 1	1Gesso : 3Areia (0,033108)	1Cim : 3Areia (0,038055)	1Cal : 2Poz : 7Areia (0,056975)	1Cim : 3Chorreio (0,063184)	1Gesso : 4Areia (0,067499)
Elvas 2	1Cim : 3Areia (0,088839)	1Cim : 3Chorreio (0,097951)	1CH : 3Chorreio (0,102408)	1CH : 3Areia (0,104534)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,142704)
Olhão	2Cal : 0,5Cim : 7,5Areia (0,097512)	1Cal : 2Poz : 7Areia (0,108842)	2Cal : 1Poz : 7Areia (0,120725)	1Cal : 3Areia (0,130359)	1Cal : 2Areia (0,139980)
R 1	1Cal : 3AgregCalc (0,070264)	100% Cal (0,676177)	1Cal : 1Areia (0,701471)	1Cal : 1Poz : 3Areia (0,740015)	1Cal : 2Areia (0,793371)
R 2	1Cal : 1Cim : 3Areia (0,311642)	1Cal : 2Cim : 7Areia (0,357635)	2Cal : 1CH : 7Areia (0,364386)	1Cal : 2CH : 7Areia (0,368096)	2Cal : 1Cim : 7Areia (0,368113)

As maiores distâncias verificam-se para as argamassas mais argilosas, e são estas, portanto, as que estão mais carenciadas de amostras compatíveis, e para as quais deverá ser dada maior atenção no desenvolvimento futuro da matriz, até porque este tipo de materiais é encontrado com grande frequência em edifícios antigos. É possível observar a pouca diferença entre as cinco primeiras aproximações na maioria dos casos, o que prova o interesse e a importância de ponderar as várias possibilidades para a substituição da argamassa antiga. As cinco primeiras aproximações parecem satisfazer as necessidades do operador.

Verifica-se que as maiores distâncias são as correspondentes às amostras Avanca 2, Avanca 3 e Avanca 4, que são essencialmente argilosas, e que as primeiras aproximações referem-se, para todas elas, a argamassas de cimento, ou seja, a argamassas de elevada resistência mecânica. Este facto deve-se à elevada proporção de massa perdida no intervalo 200-600 °C comparativamente aos outros intervalos, quer para as amostras antigas, e neste caso esta perda de massa deve-se às argilas que, em princípio, não conferem carácter hidráulico à argamassa, quer para as amostras de cimento, cujos compostos hidráulicos perdem uma grande percentagem de massa no mesmo intervalo. Este aspecto mostra, mais uma vez, a necessidade da introdução de argamassas mais argilosas na base de dados da matriz, ou melhor, de argamassas hidráulicas com baixa proporção de cal, com um nível hidráulico médio, mas que proporcionem resistências mecânicas mais fracas.

Por outro lado, a amostra R 2 apresenta como primeira aproximação uma amostra de cal, cimento e areia, com uma distância de cerca de 0,30. As amostras com agregados calcários não são mencionadas nas 5 primeiras aproximações. A amostra R 2 é constituída por dois tipos de agregados, siliciosos e calcários, e como não existe na base de dados nenhuma argamassa que se aproxime desta situação, este é um factor de erro muito importante. Verifica-se a necessidade de inserção de amostras com quantidades variáveis de vários tipos de agregados.

Nas amostras Avanca 1, Avanca 5, Avanca 6 e Elvas 2 são referidas como melhores correspondências argamassas de cimento e cal hidráulica, com distâncias pequenas e com pouca diferença entre cada aproximação. As resistências mecânicas devem ser ponderadas e, por exemplo no caso de Avanca 1, deve optar-se por uma terceira aproximação, neste caso 2Cal : 1CH : 7Areia, que é uma argamassa com resistências mais baixas. A

possibilidade de observar as propriedades mecânicas, de densidade e de porosidade das amostras da base de dados mostra-se assim muito importante.

Para Avançar acabamento e Olhar as argamassas mais aproximadas são de cal, porque logo à partida se definiu que a busca na base de dados devia ser tida em conta apenas para amostras deste tipo, de acordo com o indicado nos resultados das várias técnicas utilizadas. De qualquer forma são referidas, na maioria, argamassas bastardas com baixa percentagem de ligantes hidráulicos, ou seja, amostras em que a adição de compostos hidráulicos pode ser favorável sem alterar muito as propriedades mecânicas. Para Azurva 2 e Azenha pressupõe-se a presença de cal hidráulica, e observa-se que a matriz indica como maiores aproximações amostras de cimento e cal hidráulica. Verifica-se assim a grande fiabilidade da aplicação para argamassas deste tipo.

A amostra Elvas 1 apresenta como melhor correspondência uma amostra de base de gesso, no entanto verificou-se que o ensaio ATD/TG apresenta resultados contraditórios da difracção de raios X, que indica a presença de cal e quartzo, ao contrário da ATD/TG que nega a existência destes compostos. Este é um gerador de erros importante, e fica demonstrado um exemplo em como é muito importante algum discernimento para analisar a veracidade de alguns resultados.

Por fim, verifica-se que para R 1 deve ser considerada apenas a primeira aproximação como opção para restauro, já que as restantes hipóteses apresentam distâncias muito elevadas. Verifica-se mais uma vez a fiabilidade da análise da matriz pois, sendo esta uma argamassa de constituição química conhecida, obtiveram-se os resultados esperados.

Com todas estas considerações pode concluir-se a efectividade da matriz que foi construída, referindo a vantagem e a necessidade de se poderem adicionar outras argamassas à base de dados. Como trabalho futuro sugere-se uma renovação contínua da base de dados, acompanhada de um estudo das suas maiores carências e das maiores necessidades de argamassas de restauro para edifícios antigos. Devem também ser confirmados os resultados algo duvidosos obtidos para algumas amostras, nomeadamente CH 1 e CHO Cal. Caso os resultados desta nova caracterização sejam diferentes dos obtidos em primeiro lugar, pode facilmente corrigir-se esse erro na matriz.

Como as argamassas R 1 e R 2 são argamassas que foram desenvolvidas com objectivos de restauro de edifícios antigos, optou-se por introduzi-las desde já na base de dados. Desta forma contorna-se, à partida, uma das carências da base de dados, que está relacionada com a ausência de argamassas com mais de um tipo de agregado.

8 Conclusões

8 Conclusões

Com a realização deste trabalho verificou-se a dificuldade que existe actualmente na execução de processos de conservação e restauro de edifícios antigos de pouco valor histórico. A matriz construída pode contornar este aspecto, na medida em que torna todo o processo mais simples, pois não necessita de uma grande dedicação na análise de argamassas, que de outro modo teria de ser exaustiva, rápido e menos dispendioso. Estes factores são muito importantes para os sectores de Conservação e Restauro e de Materiais de Construção, e podem contribuir para uma valorização do património edificado em Portugal.

Ao longo deste trabalho foram desenvolvidas algumas argamassas, que foram inseridas na base de dados da matriz, e que se pretende que representem as argamassas mais utilizadas em edifícios antigos a nível nacional. Com o teste à fiabilidade da matriz foi possível verificar a existência de algumas lacunas, principalmente em argamassas essencialmente argilosas, sem serem necessariamente hidráulicas, e em argamassas com mais do que um tipo de agregado. Este aspecto não é forçosamente negativo, já que a matriz foi criada com o objectivo de, sempre que necessário, se poderem alterar e adicionar novas argamassas. Estes devem ser os principais pontos em foco no desenvolvimento futuro da matriz, explorando também mais algumas variações de traço para os mesmos materiais. Por outro lado, as amostras CHO Cal e CH 1, cujos resultados obtidos foram considerados duvidosos, devem ser novamente caracterizadas para que, se necessário, a sua informação possa ser corrigida.

De qualquer forma verificou-se a efectividade da matriz para as amostras hidráulicas e para as de base de cal, nomeadamente para a amostra R 1, que é uma argamassa de constituição química conhecida. Sabendo que as argamassas R 1 e R 2 foram desenvolvidas propositadamente para aplicar em situações de restauro de edifícios antigos, mostra-se vantajoso inserir estas argamassas na base de dados, e por isso optou-se por actualizar de imediato a aplicação com estas duas amostras, de forma a que possam contribuir para o cálculo da matriz na próxima utilização. Este passo deve ser dado também com outras argamassas que sirvam actualmente objectivos de restauro.

Durante a análise das argamassas antigas foi possível observar uma tendência generalizada para o uso de argamassas argilosas ou hidráulicas em argamassas de alvenaria, em funções em que a resistência mecânica deve ser privilegiada, enquanto que as argamassas de cal são utilizadas principalmente em acabamentos exteriores, cuja principal utilidade é providenciar uma camada final regularizadora e esteticamente mais agradável. Por outro lado foi possível verificar uma certa preocupação em manter materiais idênticos quando se analisaram várias fases de construção do mesmo edifício. Estes factos indicam um conhecimento generalizado, mesmo por parte dos construtores antigos, das propriedades dos vários materiais, das vantagens da utilização da cal hidráulica e da necessidade de compatibilidade dos materiais quando depositados no edifício em diferentes fases.

É de realçar a importância da comparação, não apenas em termos químicos, mas também em termos de propriedades físicas e mecânicas, já que devem privilegiar-se argamassas idênticas ou, em alternativa, mais fracas e de maior porosidade, para que as argamassas de restauro possam ser sacrificadas para benefício da estrutura de suporte antiga, quer por razões da ética de restauro, quer pela maior facilidade e rapidez de substituição destes materiais mais modernos. A matriz que foi construída mostra-se muito útil neste aspecto, pois permite uma comparação directa entre as várias propriedades das argamassas antigas e para restauro.

Por fim refere-se que a escolha das técnicas de caracterização foi muito importante para a realização deste trabalho, já que se torna necessário obter informação sobre várias propriedades das argamassas. Mais uma vez se realça a dificuldade, e muitas vezes a tendência para a obtenção de resultados erróneos, como se verificou para a amostra Elvas 1, na análise de argamassas antigas sem comparação entre as várias perspectivas fornecidas pelas diferentes técnicas.

Chama-se também a atenção para a vantagem e a necessidade da definição de um procedimento mais ou menos sistemático que possa ser implementado na área da Conservação e Restauro de edifícios antigos de pouca importância histórica, para o qual este trabalho pode dar algum contributo, ajudando desta forma à preservação de uma herança histórica, que apesar de pouco valor artístico, pode ter um valor sentimental importante.

9 Referências Bibliográficas

9 Referências Bibliográficas

- [1] <http://www.atr-br.com> - Atelier de conservação e restauro online.
- [2] ICOMOS, "Carta de Veneza", 1964, http://www.icomos.org/docs/venice_charter.html.
- [3] Lourenço, Bettina C. G.; "Reintegração das argamassas históricas", 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [4] Mateus, João Mascarenhas; "Técnicas tradicionais de construção de alvenarias", Livros Horizonte, Lisboa, 2002.
- [5] Anagnostopoulos, C.A.; Anagnostopoulos, A. C.; "Polymer-cement mortars for repairing ancient masonries mechanical properties", *Construction and Building Materials*, 16 (2002), pp 379-384.
- [6] Warren, John; "Conservation of Brick", Cap. 12 – Mortars, Renderings and Plasters, Butterworth Heinemann, England, 1999.
- [7] "Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes", Edited by Smith, M.R.; Collis, L.; Geological Society, England, 1993.
- [8] Carrington, D.; Swallow, P.; "Limes and lime mortars – part two", *Journal of Architectural Conservation* 1 (1996), pp 7-22.
- [9] Veiga, M.R.; "As argamassas na conservação", Comunicação apresentada nas 1^{as} jornadas de Engenharia Civil, Aveiro, Portugal, 2003.
- [10] Veiga, M.R.; "Comportamento das argamassas de revestimento de paredes – Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação", Dissertação de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1998.
- [11] Silveira, P.M.; Veiga, M.R.; Brito, J.; "Paredes estucadas em edifícios antigos", 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [12] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S.; "Composite materials in ancient structures", *Cement and Concrete Composites* 27 (2005), pp 295-300.
- [13] Sabbioni, C.; Bonazza, A.; Zappia, G.; "Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal", *Journal of Cultural Heritage* 3 (2002), pp 83-88.
- [14] Lanas, J.; Pérez-Bernal, J.L.; Bello, M.A.; Alvarez Galindo, J.I.; "Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars", *Cement and Concrete Research* 34 (2004), pp 2191-2201.
- [15] Velho, José; Gomes, Celso; Romariz, Carlos; "Minerais Industriais", Universidade de Aveiro, Portugal, 1998.
- [16] Blezard, Robert G.; "Lea's Chemistry of Cement and Concrete", Cap. 1 – The History of Calcareous Cements, 4th Ed, Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [17] Sebaibi, Y.; Dheilily, R.M.; Quéneudec, M.; "A study of the viscosity of lime-cement paste: influence of the physico-chemical characteristics of lime", *Construction and Building Materials* 18 (2004), pp 653-660.
- [18] Bennett, B.; "Lime plaster and render reinforcement", *The Building Conservation Directory*, 2002.
- [19] EMOdico, Dicionário Técnico, European Mortar Industry organization, 3rd Ed, 2001.
- [20] Norma Europeia EN 998 "Specification for mortar for masonry", Partes 1-2, 2003.

- [21] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K.; “Investigation of the technology of historic mortars”, *Journal of Cultural Heritage* 1 (2000), pp 45-58.
- [22] Moropoulou, A.; Polikreti, K.; Bakolas, A.; Michailidis, P.; “Correlation of physicochemical and mechanical properties of historical mortars and classification by multivariate statistics”, *Cement and Concrete Research* 33 (2003), pp 891-898.
- [23] Genestar, C.; Pons, C.; “Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterisation.”, *Journal of Cultural Heritage* 4 (2003), pp 291-298.
- [24] Moropoulou, A.; Cakmak, A.S.; Biscontin, G.; Bakolas, A.; Zendri, E.; “Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian’s Hagia Sophia”, *Construction and Building Materials* 16 (2002), pp 543-552.
- [25] Constantinides, I.; “Tradicional lime plaster: myths, preconceptions and the relevance of good practice”, *The Building Conservation Directory*, 1995.
- [26] http://www.ufv.br/dec/EngCivil/Disciplinas/civ362/Texto_aula_patologia.html
- [27] Lanás, J.; Álvarez, J.I.; “Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior”, *Cement and Concrete Research* 33 (2003), pp 1867-1876.
- [28] Elert, K.; Cultrone, G.; Rodríguez Navarro, C.; Sebastián Pardo, E.; “Durability of bricks used in conservation of historic buildings – influence of composition and microstructure”, *Journal of Cultural Heritage* 4 (2003), pp 91-99.
- [29] Franzini, M.; Leoni, L.; Lezzerini, M.; «A procedure for determining the chemical composition of binder and aggregate in ancient mortars : its application to mortars from some medieval buildings in Pisa”, *Journal of Cultural Heritage* 1 (2000), pp 365-373.
- [30] Sims, I.; Brown, B.; “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 16 – Concrete Aggregates, 4th Ed, Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [31] Domone, P.L.; “Construction Materials – Their nature and behavior”, Part 3 – Concrete, E & FN SPON, 2nd Ed, England, 1994.
- [32] Dados do Instituto Geológico e Mineiro – www.igm.ineti.pt
- [33] Kawiak, T.; “Gypsum mortars from twelfth-century church in Wislica, Poland”, *Studies in Conservation* 36 (1991), pp 142-150.
- [34] Elert, K.; Cultrone, G.; Rodríguez Navarro, C.; Sebastián Pardo, E.; Hanson, E.; Cazalla, O.; “Lime mortars for the conservation of historic buildings”, *Studies in Conservation* 47 (2002), pp 62-75.
- [35] Oliveira, M.M.; Santiago, C.C.; Amaral, A. M.; Franco, T.F.S.; “Estudo de algumas argamassas tradicionais de cais”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [36] Van Balen, K.; Van Gemert, D.; “Modelling lime mortar carbonation”, *Materials and Structures* 27 (1994), pp 393-398.
- [37] Rodrigues, P.F.; Henriques, F.M.A.; “Avaliação comparativa de cais aéreas correntes”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [38] Baronio, G.; Binda, L.; “Study of the pozzolanicity of some bricks and clays”, *Construction and Building Materials* 11 (1997), pp 41-46.
- [39] Maravelaki-Kalaitzaki, P.; Bakolas, A.; Moropoulou, A.; « Physico-chemical study of Cretan ancient mortars», *Cement and Concrete Research* 33 (2003), pp 651-663.

- [40] Velosa, A. L.; Veiga, M. R.; “Desempenho de argamassas de cal com pó de tijolo. Influência da temperatura de cozedura dos tijolos”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [41] Lawrence, C. D.; “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 4 – The Constitution and Specification of Portland Cements”, 4th Ed, Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [42] Especificação LNEC E 378 – Betões - Guia para a utilização de ligantes hidráulicos; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1996.
- [43] Taylor, G.D.; “Materials in Construction”, 2nd Edition, Longman, England, 1994.
- [44] Odler, I.; “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 6 – Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement”, 4th Ed, Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [45] Braga Reis, M. O.; “Os cimentos. Panorama actual e tendências de evolução”; Informações científicas e técnicas de materiais de construção, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1990.
- [46] Massazza, F.; “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 10 – Pozzolana and Pozzolanic Cements, 4th Ed, Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [47] Shannag, M.J.; Yeginobali, A.; “Properties of pastes, mortars and concretes containing natural pozzolan”, Cement and Concrete Research 25 (1995), pp 647-657.
- [48] Targan, S.; Olgun, A.; Erdogan, Y.; Sevine, V.; “Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of Portland cement”, Cement and Concrete Research 33 (2003) pp 1175-1182.
- [49] Especificação LNEC E 374 – Adjuvantes para argamassas e betões – Características e verificação da conformidade; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1993.
- [50] Leonhardt, F.; Mönnig, E.; “Construções de concreto”, Volume 1, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 1977.
- [51] Edmeades, Rodney M.; Hewlett, Peter C.; “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 15 – Cement Admixtures, 4th Ed, Butterworth Heinemann, England, 1998.
- [52] Vekey, R.C. de; “Construction Materials – Their nature and behavior”, Part 5 – Brickwork and Blockwork, E & FN SPON, 2nd Ed, England, 1994.
- [53] Hendry, A.W.; Sinha, B.P.; Davies, S.R.; “Design of masonry structures”, 3rd Edition, E & FN Spon, England, 1997.
- [54] Zappia, G.; Sabbioni, C.; Pauri, M.; Gobbi, G.; “Mortar damage due to airborne sulfur compounds in a simulation chamber”, Materials and Structures 27 (1994), pp 469-473.
- [55] Hees, R.P.J.; Wijffels, T.J.; Klugt, L.J.A.R.; “Thaumasite swelling in historic mortars: field observations and laboratory research”, Cement & Concrete Composites 25 (2003), pp 1165-1171.
- [56] Moropoulou, A.; Polikreti, K.; Ruf, V.; Deodatis, G.; “San Francisco Monastery, Quito, Equador: characterisation of building materials, damage assessment and conservation considerations”, Journal of Cultural Heritage 4 (2003), pp 101-108.
- [57] Selwitz, C.; Doehne, E.; “The evaluation of crystallization modifiers for controlling salt damage to limestone”, Journal of Cultural Heritage 3 (2002), pp 205-216.
- [58] Gonçalves, T.D.; “Colocação a descoberto de alvenarias antigas originalmente revestidas e sujeitas à acção de sais solúveis. Utilização de hidrófugos de superfície”,

- 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [59] Woolfitt, C; “Soluble salts in masonry”, The Building Conservation Directory, 2000.
- [60] Guterres, P.R.C.; “Umidade em paredes: diagnóstico de argamassas de revestimento afectadas por eflorescências”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [61] Henriques, F.A.A.; Rato, V.M.; “Avaliação do comportamento de argamassas face a fenómenos de higroscopicidade”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [62] Rato, Vasco M.; “Conservação do património histórico edificado. Sistematização de princípios gerais”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [63] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Bisbikou, K.; “Characterization of ancient, byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques”, *Thermoquimica Acta* 269/270 (1995), pp 779-795.
- [64] Paama, L; Pitkänen, I.; Rönkkömäki, H.; Perämäki, P.; “Thermal and infrared spectroscopic characterization of historical mortars”, *Thermoquimica Acta* 320 (1998), pp 127-133.
- [65] Norma Europeia EN 1015 “Methods of test for mortar for masonry”, Partes 1-19, 1998-2002.
- [66] Bakolas, A.; Biscontin, G.; Moropoulou, A.; Zendri, E.; “Characterization of structural Byzantine mortars by thermogravimetric analysis”, *Thermochimica Acta* 321 (1998), pp 151-160.
- [67] Biscontin, G.; Pellizon Birelli, M.; Zendri, E.; “Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars”, *Journal of Cultural Heritage* 3 (2002), pp 31-37.
- [68] Santos Silva, A.; “Nova abordagem na caracterização de argamassas antigas”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [69] Luxán, M.P.; Dorrego, F.; “Anciente XVI century mortar from the Dominican Republic: its characteristics, microstructure and additives”, *Cement and Concrete Research* 6 (1996), pp 841-849.
- [70] Henriques, F.A.A.; “Pedras naturais e artificiais. Análise de argamassas”, Fichas de ensaio 01, 02, 06, 08, 11, 12, 19, 20, 21, 27, Departamento de Engenharia civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Caparica, Portugal, 1996-2002.
- [71] Rodrigues, P.F.; “Argamassas de cal aérea com comportamento hidráulico”, 3º encontro sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 2003.
- [72] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Moundoulas, P.; Aggelakopoulou, E.; Anagnostopoulou, S.; “Strenght development and lime reaction in mortars for repairing historic masonries”, *Cement and Concrete Composites* 27 (2005), pp 289-294.

Anexo - Informatização da matriz

The Wall

Anexo - Informatização da matriz *The Wall*

Neste capítulo será descrito o processo de programação da aplicação de base da matriz. Este processo contou com a ajuda de uma equipa informática da Weber Cimenfix, que utilizou uma aplicação Visual Basic.net.

Em primeiro lugar foram introduzidas em base de dados Access as amostras que servem como “biblioteca”. A cada amostra, ou traço, são dados um número e nome de identidade, e é feita uma descrição. Noutras tabelas foram descritas as variáveis, ou parâmetros, de decisão, que são os valores de temperatura da análise ATD/TG, os valores obtidos no ataque químico e as opções para DRX. Para a criação de cada variável foi necessário definir:

- Nome da variável
- Tipo (Contínuo / Discreto)
- Intervalo
 - Contínuo (se tipo = contínuo)
 - Conjunto de Valores (se tipo = Discreto)
- Peso (Importância atribuída através de factores de multiplicação)
- Opção de visualização na página inicial da aplicação (para a qual se optou afirmativamente para as três variáveis)

Por fim associam-se as várias tabelas, e para cada variável são introduzidos os dados dos parâmetros de decisão. Está assim criada a aplicação da matriz, à qual se deu o nome de *The Wall*.

O objectivo é o utilizador inserir na aplicação, para os diferentes parâmetros, os dados obtidos na análise correspondente. Após inserir todos os dados pede-se à aplicação para calcular as proximidades. Nesta altura são mostradas as amostras mais próximas, e o utilizador pode consultar informação complementar antes de escolher apenas uma delas. Esta informação foi inserida na base de dados como uma descrição do traço.

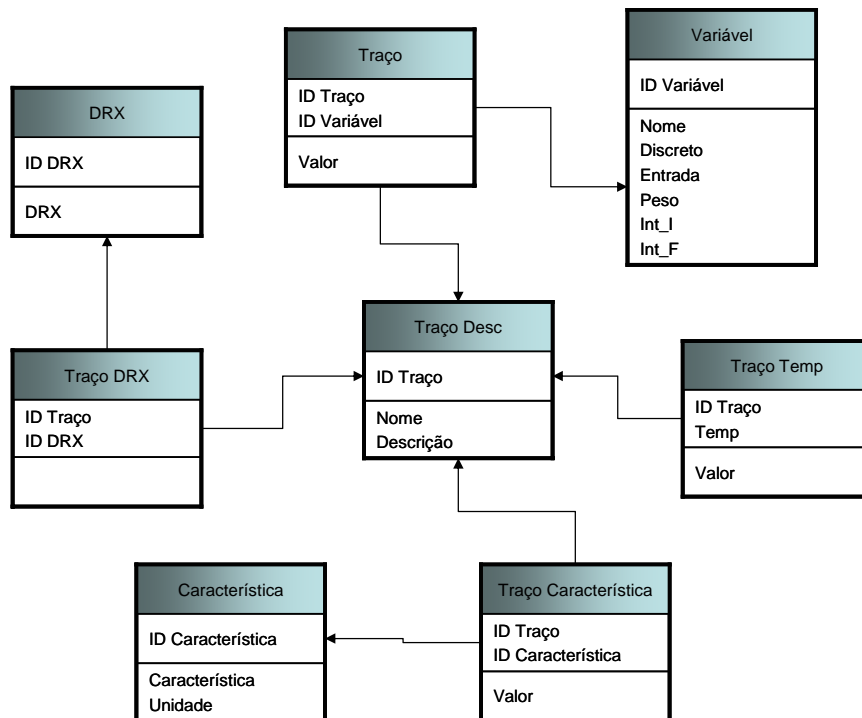


Fig. 34 – Organograma representativo das associações entre os vários parâmetros de decisão inicial, efectuadas em base de dados Access.

Após o cálculo é possível introduzir informação complementar relativa à amostra que se está a analisar, através do preenchimento de vários campos. Como já referido, esta informação é relativa à granulometria, densidade geométrica, porosidade, densidade por método de saturação e propriedades mecânicas. Em termos de aplicação, as definições para estes campos são mais simples, basta determinar que estes parâmetros, para os quais não estão associados valores ou intervalos, aparecem na página da aplicação depois da primeira fase de comparação.

Por fim, depois de preenchida toda a informação complementar, está disponível a funcionalidade de impressão, contendo a descrição completa do traço mais próximo escolhido e da argamassa que se está a analisar.

Cálculo das proximidades

Foi definido que o método de cálculo para a correspondência entre a argamassa a analisar e as argamassas da base de dados seria o cálculo das proximidades, ou seja, para calcular o

traço mais próximo da amostra analisada será calculada a distância vectorial a todos os traços possíveis, sendo considerado o mais próximo o que apresentar a menor distância.

Sendo, x_X a amostra analisada e Y_n os n traços possíveis. As distâncias de X a cada traço (d_n) são dadas por:

$$d_n = ||X - Y_n||^2 \quad (18)$$

O traço mais próximo será: Y_n , $\text{Min}(d_n)$. Após efectuado o cálculo são apresentados os 5 resultados mais próximos ordenados decendentemente, e o utilizador pode obter informação mais detalhada sobre cada um deles, de forma a escolher apenas um.

Sempre que necessário, a aplicação pode ser adicionada de novos traços, que podem mesmo ser os resultados de uma análise, que são guardados na base de dados, e pode ser adicionada de novas variáveis de decisão, directamente nas tabelas da base de dados. O objectivo é criar uma base de dados cada vez mais extensa, e que a matriz possa ser melhorada constantemente, trazendo cada vez maior fiabilidade na análise.